ÜBER DEN

EINFLUSS DES DRUCKES

AUF DIE

VISCOSITÄT DES WASSERS.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER DOCTORWÜRDE

EINER HOHEN NATURWISSENSCHAFTLICHEN FAKULTÄT

DER

EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT ZU TÜBINGEN

VORGELEGT VON

LUDWIG HAUSER

AUS TUTTLINGEN.

STUTTGART 1900.

DRUCK VON A. BONZ' ERBEN.

ÜBER DEN

EINFLUSS DES DRUCKES

AUF DIE

VISCOSITÄT DES WASSERS.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER DOCTORWÜRDE

EINER HOHEN NATURWISSENSCHAFTLICHEN FAKULTÄT

DER

EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT ZU TÜBINGEN

VORGELEGT VON

LUDWIG HAUSER

AUS TUTTLINGEN.

STUTTGART 1900.

DRUCK VON A. BONZ' ERBEN.

Von der Fakultät angenommen den 1. August 1900.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung 5

Apparate:

1. Pumpe mit Manometer 6
2. Presscylinder 6
3. Wasserbad 7
4. Rührvorrichtung 10
5. Viscositätsapparate 11
6. Wasserfüllapparat 12

Relative Bestimmungen:

1. Allgemeines 15
2. Messung der Durchflusszeit 17
3. „ „ Temperatur 20
4. „ „ Druckhöhen 24
5. Gang eines Versuches 26

Versuche:

1. Ausfluss unter Wasser 27
2. „ „ Quecksilber 37
3. Correction für die Methode des Ausflusses unter Wasser . . . 44

Resultate 47

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552310_0150

Einleitung.

Durch die Untersuchungen der H. H. v. Röntgen[1], Warburg und Sachs[2], Cohen[3] ist nachgewiesen worden, dass die Viscosität des Wassers durch Druck verringert wird. Es wurde gefunden, dass der Einfluss des Druckes bei Wasser in der Nähe von 0° am grössten ist und mit steigender Temperatur abnimmt. Ein Minimum der Viscosität konnte nicht beobachtet werden, obwohl die HH. Warburg und Sachs Temperaturen bis 40° C und Herr Cohen Drucke bis 900 Atmosphären anwandten.

Auf Anregung von Herrn Professor Dr. K. R. Koch habe ich Versuche über die Abhängigkeit der Viscosität des Wassers von hohen Drucken [bis zu 500 at] in dem Temperaturintervall von 15° bis 100° angestellt.

Angewandt wurde die Poiseuille'sche Methode der Strömung durch Capillaren.

Bezeichnet man mit Q die Ausflussmenge in der Zeit τ, mit l die Länge der Capillaren, mit r den Radius derselben, mit p den Überdruck und mit η eine von der Natur der Flüssigkeit und der Temperatur abhängige Konstante, so lautet das Poiseuille-sche Gesetz:

$$Q = \eta \frac{p r^4}{l} \tau.$$

Die Theorie wurde erst später von Hagenbach, Neumann, Helmholtz entwickelt. Sie liefert die Beziehung:

---

[1] Röntgen, Wied. Ann. 22. p. 510. 1884.

[2] Warburg und Sachs, Wied. Ann. 22 p. 518. 1884.

[3] Cohen, Wied. Ann. 45. p. 666. 1892.

$$Q = \pi \frac{p}{8 \eta l} (r^4 + 4 \frac{\eta}{\lambda} r^3) \tau.$$

λ bedeutet die äussere Reibung. Setzt man für den Fall der guten Benetzung der Capillareninnenwand λ gleich einem grossen Wert, so gelangt man wieder zum Poiseuille'schen Gesetz. Bestimmungen dieser äusseren Reibung liegen aus jüngster Zeit vor, auch wurde ihre Abhängigkeit vom Überdruck p nachgewiesen von Herrn Wetzstein[1].

Das Poiseuille'sche Gesetz zu Grunde legend, versuchte ich, die darin vorkommenden Grössen zu bestimmen, um den Reibungskoefficienten zu berechnen. Von der Mitteilung solcher absoluten Bestimmungen der Reibungskoefficienten sehe ich an dieser Stelle ab und beschränke mich darauf, relative Messungen über die Abhängigkeit des Reibungskoefficienten vom Druck bei Temperaturen von 15° bis 100° mitzuteilen.

Apparate.

1. Zur Verfügung stand eine Cailletet'sche Pumpe von Ducretet in Paris. Das Manometer derselben zeigte Drucke bis 300 at. an. Um aber auch höhere Drucke anwenden zu können, wurde das Ducretet'sche Manometer durch eines von Eckardt (Stuttgart) ersetzt, welches bis 1000 at. Druck angab.[2] Der weitaus grösste Teil der Versuche wurde bei einem Druck von 400 at. ausgeführt. Als Druckflüssigkeit in der Cailletet'schen Pumpe diente destilliertes Wasser.

2. Der Presscylinder aus Tiegelstahl für 500 at. Arbeitsdruck mit 10facher Sicherheit, geliefert von der Maschinenfabrik Kuhn (Berg-Stuttgart) war 70 cm lang und bei einem äusseren Durchmesser von 11 cm im lichten 5 cm weit. Das Verschlussstück A (Fig. 1) bestand aus Maschinenstahl von Krupp;

---

[1] Wetzstein, Wied. Ann. 68. p. 441. 1899.

[2] Das Manometer wurde an einer Cailletet'schen Presse mit einem Präcisionsmanometer verglichen, welches in der Physik. Techn. Reichsanstalt geaicht war.

dieses Material erwies sich als absolut dicht im Gegensatz zu Rotgussdeckelscheiben, die nicht frei von Gussporen waren. Das cylindrische Verschlussstück war unten bei R (Fig. 1) konisch abgedreht, es wurde auf eine kongruente konische Ringfläche R im Inneren des Cylinders aufgeschliffen. Durch eine Überwurfmutter U wurde das Verschlussstück A eingepresst. Diese Art der Dichtung ohne Dichtungsringe (Kupfer, Asbest, Gummi u. s. w.) war notwendig, um bei der Versuchsreihe I (s. unten) den am Verschlussstück befestigten Viscositätsapparat stets gleich tief in das Quecksilber des Compressionscylinders einzutauchen. Zum Anziehen der Überwurfmutter dienten zwei an der Zimmerdecke aufgehängte, 65 cm lange Mutterschlüssel S_1 und S_2 (Fig. 2). Mittels einer der Kupplung zwischen Eisenbahnwagen ähnlichen Spannvorrichtung T (Fig. 2) liess sich die Dichtung leicht bewerkstelligen. Durch das Verschlussstück waren zwei Kupferdrähte C_1, C_2 (Fig. 4) isoliert und dicht durchgeführt. Das zu diesem Zweck verwandte Material war Vulkanfiber.

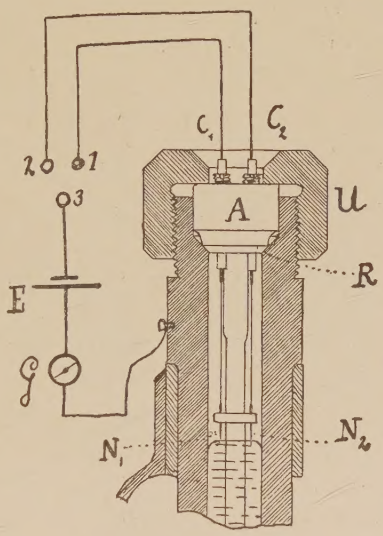


Fig. 1.

Der Presscylinder wurde von einem dreibeinigen Traggestell T (Fig. 9 s. Anhang) aufgenommen, letzteres hing vermittelst des Dreiecks D an der losen Rolle R eines Differentialflaschenzuges, der an der Zimmerdecke befestigt war; so konnte bequem der Presscylinder gehoben und gesenkt werden. Bei den Versuchen war er in einem grossen Wasserbad W eingetaucht.

3. Dieses bestand aus einem Holzbottich mit doppeltem Boden, 70 cm weit, 95 cm hoch, der mit Wasser gefüllt wurde. Oben war ein Überaich angebracht.

Zum Erwärmen des Wasserbades wurde Dampf benützt. Derselbe wurde einem grossen Dampfkessel der Centralheizung der technischen Hochschule entnommen, es blieb der Dampfdruck

während der Dauer eines Versuches so gut wie konstant. Der Dampf strömte durch einen, auf dem Boden des Bottichs liegenden, einseitig geschlossenen kreisförmigen Ring aus Gasrohr G G (Fig. 4, 9) aus kleinen Löchern aus; letztere waren auf der Oberseite des Ringes in gleichen Abständen in grosser Zahl ca. 50 angebracht. Dieser Ring war mit einem an der Innenwand des Bottich liegenden Rohrstück S (Fig. 4) verbunden, welches durch eine Schlauchverschraubung V mittels eines Panzerdampfschlauches P an die Dampfleitung L angeschlossen wurde (Fig. 4, 3). Am Ende der Dampfleitung L (Fig. 3) sassen drei Ventile. Zum Erwärmen des Wasserbades auf eine bestimmte Temperatur war das grosse Ventil V geöffnet, die beiden kleinen Ventile V_2, V_1 geschlossen. Um die Temperatur des Wasserbades konstant zu halten, wurde das grosse Ventil V geschlossen und es war durch Regulieren des kleinen Ventiles V_2 möglich, die ziemlich beträchtlichen Wärmeverluste des Wasserbades infolge Verdunstung, Leitung und Strahlung zu decken. Ein Ansammeln von Condensationswasser in der langen Dampfleitung L wurde in Ermangelung eines Condenstopfes durch beständiges Offenhalten von V_1 (nur wenig geöffnet) vermieden. Dieser Dampf, der aus der Nebenleitung l durch V_1 abströmte, wurde durch einen Wasserstrahl im Ablauf der Wasserleitung kondensiert. Das ca. 350 l fassende Wasserbad konnte in ca. $^3/_4$ h bis auf 100° erwärmt werden. Durch die eben beschriebene Vorrichtung war es nun möglich, bei minimaler Dampfzufuhr unter Ausschluss

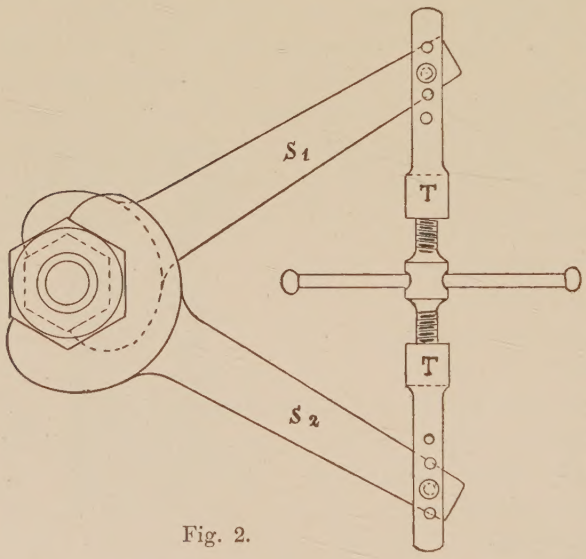


Fig. 2.

des Condensationswassers die Temperatur im Wasserbad bis auf geringe Schwankungen von $^1/_{20}{}^0$ bis $^1/_{10}{}^0$ C stundenlang konstant zu erhalten. Dabei zeigte es sich, dass die Konstanz der Temperatur bei höherer Temperatur im Allgemeinen leichter zu erhalten war als bei mittleren Temperaturen.

Die aus dem Wasserbad aufsteigenden Dämpfe wurden durch einen helmartigen, 1 m über dem Cylinder hängenden Blechschirm H (Fig. 9) in eine weite Rohrleitung M von einem Ventilator angesaugt und in einem Wasserablauf weiterbefördert. Der Ventilator wurde durch einen Elektromotor angetrieben.

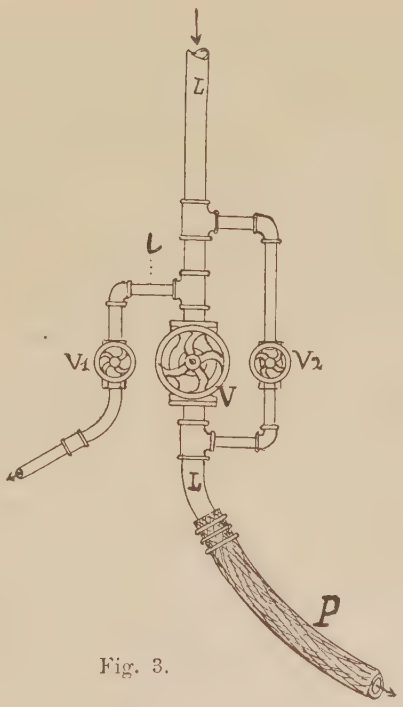


Fig. 3.

Bei der verhältnismässig grossen Höhe des Wasserbades war das Temperaturgefälle in vertikaler Richtung nicht unbeträchtlich. Die Temperaturunterschiede von oben gegen unten überstiegen bei höherer Temperatur 1°. Es waren in gleichen Abständen von 20 cm in verschiedenen Höhen vier Thermometer durch die Wand des Wasserbades vermittelst Kork dicht eingesetzt. Die Skalen ragten nur soweit heraus, dass eben die Ablesung noch möglich war; so fiel die bei herausragendem Faden immer unsichere Korrektion fort. Die Thermometer waren mit einem Normalthermometer bei entsprechenden Temperaturen verglichen.

Es mag hier die Beschreibung folgen über die Temperaturverhältnisse des Wasserbades.

Nachdem das Wasserbad über Nacht ruhig gestanden, wurden folgende Temperaturen abgelesen:

oben	oberhalb der Mitte	unterhalb	unten
t_4	t_3	t_2	t_1
24.5°	24.2°	24.1°	24.0°

Um $11^h\ 9^m$ a. m. wurde bei ganz geöffnetem Ventil V Dampf eingeleitet und $11^h\ 44^m$ folgende Thermometerstände gefunden:

t_4	t_3	t_2	t_1
62.0°	61.3°	60.9°	60.8°

Während also bei ruhig stehendem Wasserbad bei Zimmertemperatur Differenzen zwischen oben und unten bis 0.5° C sich zeigten, überstiegen dieselben 1° bei höherer Temperatur, obwohl der Dampf in gewissem Sinne rührte; er entströmte ja den 50 Öffnungen, die über den Umfang des Wasserbades gleichmässig verteilt waren. Bei der grossen Weite des Wasserbades zeigten sich auch in horizontaler Richtung beträchtliche Temperaturunterschiede, es handelte sich deshalb um eine ausgiebige Rührvorrichtung.

4. Da der grösste Teil des Wasserbades durch den Presscylinder mit seinem Traggestell und Ketten, den Dampf und Kaltwasser zuführenden Rohrleitungen in Anspruch genommen war (Fig. 9), so empfahlen sich Schraubenrührer, wie sie z. B. auch von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt[1] zu Thermometer-Vergleichungen bei höheren Temperaturen angewandt werden. Doch weicht die in diesem Falle angewandte Konstruktion etwas ab. In einem unten offenen, oben geschlossenen Messingrohr B (Fig. 9) sitzt eine Drehungsaxe C, die unten bei u 2 Schraubenflügel trägt nach Art einer archimedischen Schraube. Ausserhalb des Messingrohres [über den Rand des Bottich hervorragend] trägt die Axe 2 Schnurläufe E F. Wird die Axe in rasche Rotation versetzt, so wird das von unten angesaugte Wasser gehoben und durch ein Ansatzrohr S gegen die Mitte des Wasserbades ausgestossen. Vier solcher Pumpen (Fig. 4) waren symmetrisch über den Umfang des Bottich verteilt, an der Innenwand desselben befestigt und die Schnurläufe paarweise durch Treibriemen R ohne Ende verbunden. Die eine Axe A trug ausser den Schnurläufen noch eine Riemenscheibe B, die durch einen Lederriemen L

[1] Mahlke, Zeitschr. f. Instr. 13. p. 197. 1893. 14. p. 73. 1894.

von einem Elektromotor angetrieben wurde. Als Transmissionsriemen liess ich Gummiseile mit kräftigen Hanfeinlagen anfertigen, die sich in dem dampferfüllten Raume oberhalb des Wasserbades, bei der grossen Tourenzahl und dem geringen Durchmesser der Schnurläufe gut bewährten. Alle anderen gewöhnlich gebräuchlichen Transmissionsmaterialien (Leder, Saiten, Draht, Schnüre u. s. w.) konnten für den gegebenen Fall nicht in Anwendung kommen.

Bei längerem Betriebe des Rührwerks kamen allerdings doch Streckungen der Gummiseile vor. Diesem Missstande wurde dadurch abgeholfen, dass die Pumpen von Zeit zu Zeit versetzt wurden. Der Antrieb von drei Pumpen durch eine gemeinsame Welle würde sich wohl günstiger gestalten, es liessen sich alsdann Lederriemen verwenden, wie bei der Pumpe A.

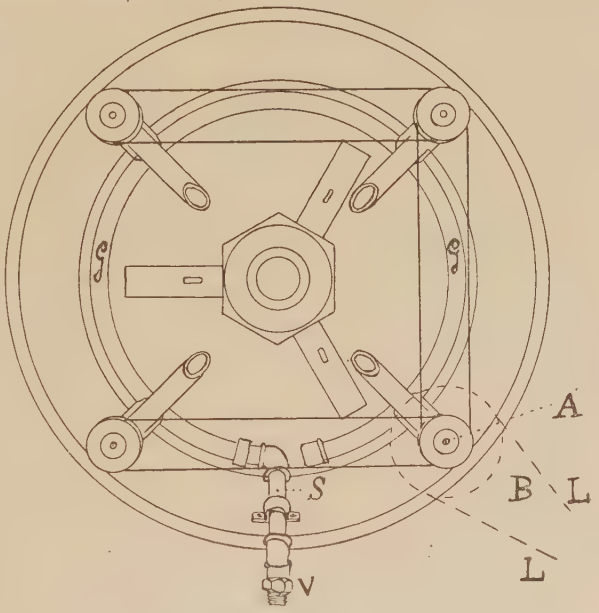


Fig. 4.

Der Temperaturausgleich durch Ingangsetzen des Rührwerkes fand in kürzester Zeit statt, wie folgender Versuch zeigt:

	t_4	t_3	t_2	t_1
$11^h 44^m$	62.0^0	61.3^0	60.9^0	60.8^0

nachdem das Rührwerk in Gang gesetzt:

$11^h 45^m$	61.6^0	61.7^0	61.6^0	61.6^0

5. Die Viscositätsapparate hatten die von Herrn Cohen[1] an-

[1] Cohen, Wied. Ann. 45. p. 666. 1892.

gewandte Form. Die zwei Platinelektroden E_1 E_2 (Fig. 5) an den Einschnürungsstellen der Gefässe waren aussen rechtwinklig nach oben gebogen und mit Glas soweit umschmolzen, dass zur Isolation der stromzuführenden Drähte vom umgebenden Quecksilber ein Kautschuckschlauch darüber geschoben werden konnte. Diese kurzen Schlauchstücke waren über enge Glasröhren gezogen, letztere isolierten die mit den Platinelektroden verlöteten Kupferdrähte C_1, C_2 vom Quecksilber und dem Compressionscylinder. Ausserhalb des Quecksilbers kommunicierte das Innere der Glasröhren mit dem Druckwasser, so dass die Glasröhren allseitig den hohen Drucken ausgesetzt waren. Die Isolation versagte nie, da der äussere Überdruck eine Dichtung der nur 2 cm langen Schlauchstücke bewirkte. [bei b Fig. 5.]

Da die Versuche in dem Temperaturintervall von 15° bis 100° C. ausgeführt wurden, so hätten bei Anwendung eines und desselben Apparates die Durchflusszeiten bei den niederen Temperaturen Stunden in Anspruch genommen. Es empfahl sich daher, jeweils zwei Apparate zu verwenden, einen mit weiterer Capillaren $d = 0{,}106$ mm für das Temperaturintervall 15° bis 60° und einen zweiten mit $d = 0{,}100$ mm für das obere Temperaturintervall 60° bis 100°. Die Auswahl der Capillaren geschah in der Weise, dass die Durchmesser der Endlumina mit einem Mikroskop mit Okularmikrometer ermittelt wurden. Alsdann wurden die 2 m langen geeigneten Röhren mit längerem abgewogenem Quecksilberfaden kalibriert, Stücke von passendem Querschnitt herausgebrochen und letztere mit dem Comparator genau kalibriert. Bei der grossen erforderlichen Länge (bis 40 cm) war es oft schwierig, gut kalibrische Stücke von passendem Querschnitt zu finden. Ich teile im folgenden das Resultat einer Calibrierung einer solchen beliebigen Capillaren mit, die zu den Versuchen verwendet wurde. Die Fadenlänge betrug an den verschiedenen Stellen der Capillaren:

51.06, [51.15, 51.21, 51.21, 51.29,
51.37, 51.15, 51.14,] 51.40, 51.30, 51.21 mm.

6. Da bei der Bestimmung der Reibungskoeffizienten nach der Methode der Strömung durch Capillaren bekanntlich Partikelchen, die sich in der Capillaren absetzen, eine sehr grosse Fehlerquelle bilden, so wurde die grösste Sorgfalt auf Füllung

der Viscositätsapparate mit absolut staubfreiem Wasser verwendet. Es geschah folgendermassen: Eine Glaskugel G (Fig. 5) von hinreichender Wandstärke war mit drei Stutzen versehen, in den einen war ein Thermometer t eingeschliffen, dessen Skala von 20° bis 100° sich ausserhalb der Kugel befand; an den mittleren war ein durch den Glashahn h vom Innenraum der Kugel absperrbares Schliffstück angeschmolzen, das zum Anschluss der Viscositätsapparate diente; der dritte Stutzen trug einen kleinen Trichter T, der durch den Dreiweghahn H von der Kugel abgeschaltet werden konnte. Bei entsprechender Stellung des Dreiweghahnes D wurde durch den Trichter destilliertes Wasser eingefüllt. In dem Trichter lag ein gehärtetes Filter, welches alle feinen Partikelchen des Wassers zurückhielt und auch seinerseits keine Fäserchen an das Filtrat abgab. Durch die Verbindung mit einer Bunsen'schen Wasserstrahlpumpe konnte das Wasser luftfrei gemacht werden; gleichzeitig wurde das Wasser erhitzt. Sämtliche Hähne und Schliffe waren selbstverständlich ungefettet. Da sie leicht mit Wasser

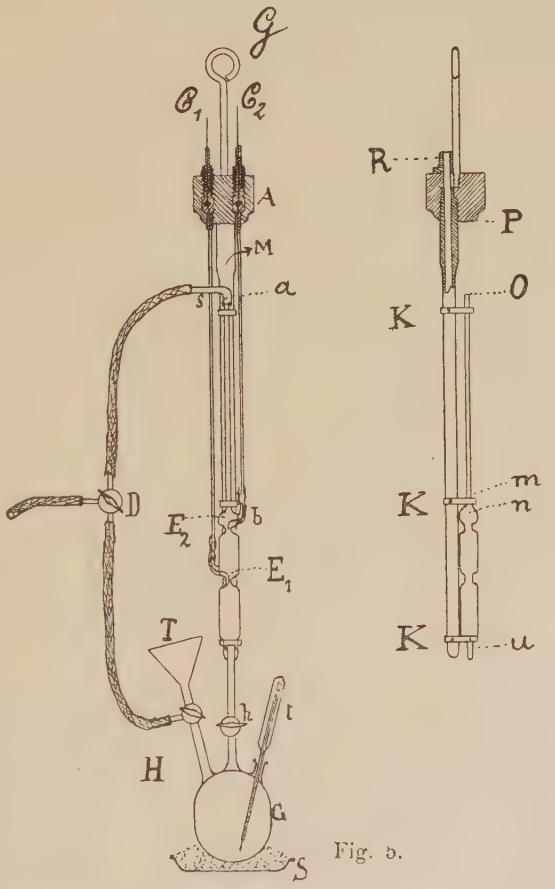


Fig. 5.

in Berührung zu bringen waren, so hielten sie stets dicht. Am Ende der Capillaren bei a wurde ein Schliffstück s aufgesetzt, welches behufs Füllung des Viscositätsapparates durch den Dreiweghahn mit der Wasserstrahlpumpe verbunden wurde. Die Kugel G stand auf einem Sandbad S. Es war so möglich, den Wasserfüllapparat mit seinem Schliff ohne Zwang an den senkrecht aufgehängten Reibungsapparat anzuschliessen. Diese Art der Füllung bot folgende wesentlichen Vorteile:

1. Der Apparat konnte mit reinem destilliertem Wasser gefüllt werden, denn da weder Kork noch Gummi zur Verwendung gelangten, so blieb das Versuchswasser frei von diesbezüglichen Verunreinigungen.

2. Das Wasser gelangte luftfrei direkt in den Viscositätsapparat; die Füllung des Apparates mit luftfreiem Wasser war unerlässlich, um das Ausscheiden von absorbierter Luft im Reibungsapparat bei den höheren Temperaturen zu vermeiden, ganz besonders bei solchen Apparaten, die ein verhältnismässig kleines Volumen zwischen den Electroden E_1, E_2 einschlossen.

3. Das Vorwärmen des Wassers und hiemit des Reibungsapparates ist vorteilhaft, um den Apparat mit seinen eingeschmolzenen Electroden beim Eintauchen in das heisse Wasserbad vor der Gefahr des Springens zu schützen.

Vor der definitiven Füllung mit dem Versuchswasser wurde der Apparat durch Hindurchsaugen von Wasser bezw. Alkohol ausgespült. Es wurden so von vorhergehenden Versuchen hängengebliebene Quecksilbertröpfchen entfernt. Nun wurde der Apparat in der gewöhnlichen Weise durch Hindurchsaugen von Salpetersäure, Wasser, Alkohol, Wasser gereinigt und hiemit die Capillare g u t benetzt. Eine Glühlampe mit matter Birne diente zum Absuchen der Capillaren [betreffs Unreinigkeit] vor und nach jedem Versuche. Nur in sehr vereinzelten Fällen (bei dieser Versuchsanordnung) waren in den Capillaren feine Glassplitterchen vorhanden, die sich von den Innenwänden losgelöst. Zu ihrer Entfernung wurde ein Schliffstück an das obere Ende der Capillaren angeschlossen, welches durch einen Schlauch mit der Wasserleitung verbunden wurde. So konnten diese Partikelchen meistens hinausgespült werden. Oft auch half das Hindurchsaugen von trockenem Quecksilber durch die getrocknete Capillare; immer aber das Er-

hitzen des Quecksilbers in der Capillaren an der Stelle, wo das Splitterchen sass. Die Stösse des siedenden Quecksilber entfernten den Eindringling.

Relative Bestimmungen.

1. Durch ein Capillarrohr von der Länge l und dem Halbmesser r fliesst unter dem konstanten Druck p in der Zeit τ ein Flüssigkeitsvolumen v aus (Poiseuille)

$$v = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{r^4}{l} \cdot p \cdot \tau.$$

Der Reibungskoeffizient η ergiebt sich aus dieser Gleichung

$$\eta = \frac{\pi}{8} \frac{r^4 p}{l v} \tau.$$

Der Reibungskoeffizient η hängt jedoch noch in hohem Masse von der Temperatur ab, ferner auch von der Pressung; jedoch ist lezterer Einfluss sehr gering, und muss man schon zu hohen Drucken übergehen, um deutliche Wirkungen zu bekommen. Die Versuche waren nun so eingerichtet, dass

$$\frac{\pi r^4 p}{8 l v}$$

eine annähernd konstante Grösse war; setzen wir diesen Ausdruck = c, so bestehen folgende Beziehungen, wenn wir mit t die Temperatur bezeichnen,

$$\eta = c \cdot t,$$
$$\eta = f(t).$$

Beim Übergang von Atmosphärendruck zu hohen Drucken ändern sich nun alle Grössen v, r, p, l, mithin auch c; jedoch zeigt eine genauere Berechnung, dass die Änderung des Wertes c zu vernachlässigen ist.[1] Wir betrachten also c für gewöhnlichen Druck und für hohe Drucke als konstant. Bezeichnet P die Pressung, so lässt sich der Reibungsoffizient darstellen als:

$$\eta_P = \varphi(t, P) = \tau_P \cdot c,$$
$$\eta_0 = \varphi(t, 0) = \tau_0 \cdot c;$$

hieraus folgt:

$$\frac{\eta_P}{\eta_0} = \frac{\varphi_{(t\,P)}}{\varphi_{(t\,0)}} = \frac{\tau_P}{\tau_0}$$

[1] Cohen, Wied. Ann. 45. p. 670. 1892.

Die procentischen Änderungen der Viscosität bei der Temperatur t und dem Druckunterschied P sind dann dargestellt durch den Ausdruck:

$$\frac{\eta_P - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = \frac{\tau_P - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100$$

Im Allgemeinen richtete ich die Versuche so ein, dass bei gleicher Temperatur die Ausflusszeiten beobachtet wurden, zuerst bei gewöhnlichem Druck: $P = o$ $\tau = \tau_0$
dann bei höherem Drucke: $P = P$ $\tau = \tau_P$

Ich führe als Beispiel einige Versuche an:

Versuche bei 70° C.

No.	Druck P	Temp. t	Ausflusszeit τ
62	0 at	70.15° C	1215.7 Sec.
64	0 at	70.20° C	1214.3 Sec.
61	400 at	70.10° C	1252.8 Sec.
63	400 at	70.15° C	1251.0 Sec.
Versuche bei 80° C.			
56	0 at	79.8° C	1067.8 Sec.
57	0 at	79.9° C	1066.5 Sec.
59	400 at	79.9° C	1103.6 Sec.
60	400 at	79.9° C	1104.4 Sec.
58	[Diese Nummer wurde übersprungen.]		

Nicht immer waren wie in den oben mitgeteilten Versuchen die Temperaturen bei gewöhnlichem Drucke und bei hohem Drucke einander gleich. Bei abweichenden Temperaturen wurden aus den Versuchen bei gewöhnlichem bezw. bei hohem Drucke zwei mittlere Durchflusszeiten für zwei mittlere Temperaturen berechnet. Alsdann wurde die Ausflusszeit des Versuches bei gewöhnlichem Druck auf die Mitteltemperatur für hohen Druck reduziert. Zu dieser Reduktion wurden die Tabellen von Landolt und Börnstein[1] über die Abhängigkeit der Zähigkeit des Wassers von der Temperatur, ferner die Resultate der Herren Rodger und Thorpe[2] benützt.

Als Beispiel mögen die Versuche bei 55°—57° hier ihre Stelle finden:

---

[1] Phys.-Chem. Tab. von Landolt und Börnstein, p. 111, 118. 1894.
[2] Rodger und Thorpe, Phil. Trans. Vol. 185, 1894. A. II. p. 444, 445.

No.	P	t	τ
51	0	55.3	1512.1
52	0	55.7	1506.1
50	0	56.0	1495.2
48	0	56.2	1488.0
54	400	56.2	1527.8
53	400	56.6	1518.5
55	400	56.8	1514.6
(51, 52, 50, 48)	0	55.8	1500.8
(54, 53, 55)	400	56.5	1520.3
(55, 52, 50, 48)*	0	56.5	1484.0

$$\frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100 = +2.5$$

2. Die Zeitmomente, in denen das Quecksilber im Viscositätsapparat die Platindrähte E_1, E_2 an den Einschnürungsstellen erreichte, vergl. Fig. 5, wurden durch einen elektromagnetischen Doppelschreiber registriert. Anfangs wurde eine Halbsekundenpendeluhr von Kutter (Stuttgart), später eine Hipp'sche Uhr mit Riefler'schem Pendel benutzt. An beiden Uhren war zur Sekundenangabe eine Kontaktvorrichtung[1] angebracht, welche auch bei den Uhren, die dem von Sterneck'schen Pendelapparat beigegeben werden, in Anwendung kommt. (s. Fig. 6.) Es mag hier eine kurze Beschreibung folgen. Das Hebelchen A B mit der Drehachse C liegt mit einem bei A aufgelöteten Platinplättchen an dem Platinstift p der Stellschraube S. Es hat nämlich der eine Arm B C ein kleines Übergewicht gegenüber dem Arm C A, so dass das Plättchen A gegen den Stift p gedrückt wird. Durch eine Spirale s aus sehr dünnem Kupferdraht steht das Kontakthebelchen A B mit seinem Achsenlager in guter metallischer Verbindung. Die Spirale ist an ihren beiden Enden mit Schräubchen befestigt. Von der Stellschraube führt ein Draht zu dem Pol einer konstanten Stromquelle, deren anderer Pol durch ein zwischengeschaltetes Relais mit dem Achsenlager leitend verbunden ist. Die Stellschraube S gestattet, die Lage

[1] K. R. Koch, Relative Schwermessungen, Zeitschr. f. Instr. 18. p. 297. 1898.

des Kontakthebels zu fixieren und sie wird so gestellt, dass das Pendel mit seinem Arm, kurz ehe es seinen Umkehrpunkt erreicht, das Kontakthebelchen für kurze Zeit abhebt, mithin bei p den Relaisstromkreis unterbricht. Der Anker des Relais schliesst den einen Stromkreis des Doppelschreibers für kurze Zeit; auf dem mit gleichförmiger Geschwindigkeit sich bewegenden Papierstreifen entstehen in gleichen Abständen die Sekundenpunkte.

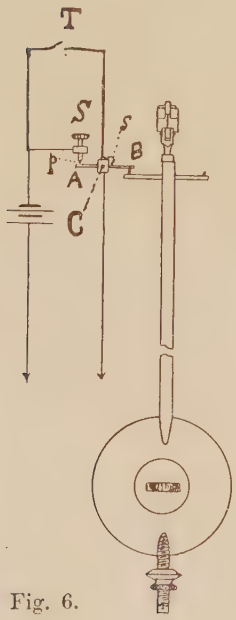


Fig. 6.

Parallel der oben beschriebenen Kontakt- bezw. Unterbrechungsvorrichtung der Uhr lag ein Taster T. Durch Niederdrücken dieses Tasters zu bestimmten notierten Uhrzeiten wurde der Relaisstromkreis durch das Pendel nicht unterbrochen, die entsprechenden Sekundenpunkte auf dem Papierstreifen fielen aus; es war so die Uhrzeit auf den Papierstreifen übertragen. Ich möchte bemerken, dass Uhr und Doppelschreiber (Chronograph) nicht im gleichen Raum aufgestellt waren.

Der Taster, mit welchem der Beobachter z. B. bei Zeitbestimmungen mittels des Passageninstrumentes die Durchgänge des Sterns durch die Fäden der Fadenplatte auf dem Streifen markiert, wurde durch folgende Auslösungsvorrichtung ersetzt. (Fig. 7.) Ein Aluminiumpendel A B mit horizontal gelagerter Drehungsachse O (zwei Stahlspitzen in trichterförmigen Glasnäpfchen[1]) wird an seinem oberen Ende durch einen seitlich anliegenden Anker a eines Elektromagneten aus seiner Ruhelage entfernt gehalten. Bewegt sich der Anker durch Stromschluss nach oben, so schwingt das Pendel durch seine Ruhelage. Nach dem Passieren der letzteren wird es durch eine Feder f festgehalten. Das untere Pendelende B, ein amalgamierter Platindraht, taucht beim Schwingen des Pendels

[1] Bei Neukonstruktion ein Pendel mit Schneide mit stromzuführender dünndrähtiger Spirale.

in Quecksilber kurze Zeit unter; das Quecksilber befindet sich in einer Holzrinne H, die mittels einer Mikrometerschraube gehoben und gesenkt werden kann. Ist nun Pendel und Quecksilber in den Tasterstromkreis des Chronographen eingeschaltet (an Stelle des Tasters), so wird durch das Pendel bei N der Strom momentan geschlossen. Auf dem Papierstreifen entsteht durch den kurzen Stromschluss ein Punkt.

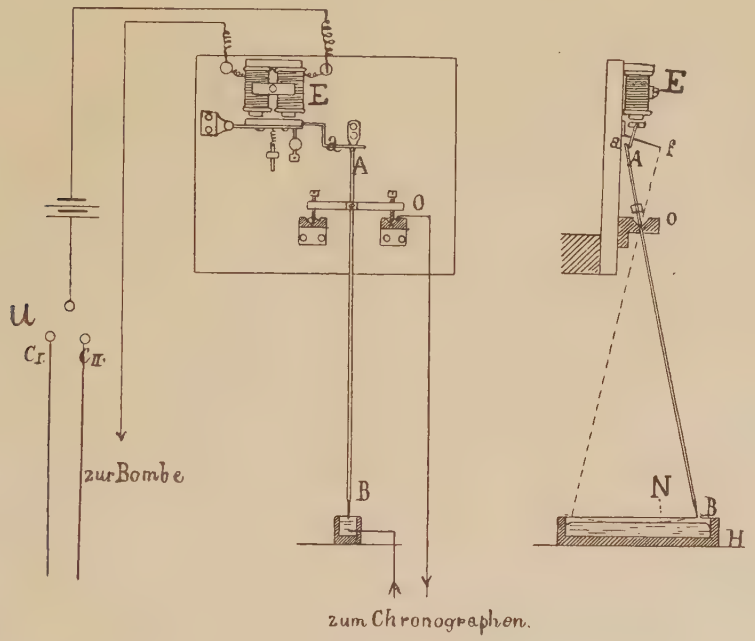


Fig. 7.

Der eine Pol eines galvanischen Elementes war mit dem Compressionscylinder und hiedurch mit dem Quecksilber leitend verbunden; von dem anderen Pol führte ein Draht zu dem Elektromagneten E und weiterhin zu dem Umschalter U. Je nach der Stellung des Umschalters lag die obere bezw. untere Platinelektrode des Viscositätsapparates am + Pol. Der Stromschluss in dem Elektromagneten E, dessen Anker a das Pendel A B auslöst, wird durch das Quecksilber bewirkt, wenn es in dem Vis-

cositätsapparat die betreffende Elektrode berührt. Die Verzögerungen durch das Anziehen des Ankers, das Herabfallen des Pendels bis zur Berührung mit dem Quecksilber in der Holzrinne, die Bewegung des Morsestiftes waren bei beiden Kontakten an beiden Elektroden gleich gross; sie fallen mithin heraus, da es sich ja um die Differenz zweier Uhrzeiten handelt.

3. Bei der grossen Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Temperatur [prozentische Änderung pro 1° C bei 20° 2.4%
30° 1.9%
90° 0.8%]
und bei dem zu erwartenden geringen Einfluss des Druckes führte ich, um die Temperatur im Inneren des Viscositätsapparates möglichst genau zu erhalten, ein Thermoelement in den Druckraum ein und ich finde diese anfänglichen Versuche in Übereinstimmung mit meinen späteren Versuchen, bei welchen die Temperatur möglichst konstant gehalten und durch ein Quecksilberthermometer angegeben wurde. Das Thermoelement bestand aus einem 3 mm dicken Palladiumdraht und entsprechendem Eisendraht, die durch die Deckelscheibe A (Fig. 5) isoliert und dicht mit Vulkanfiber eingeführt waren. Beide Drähte waren an ihrem unteren Ende zusammengeschweisst; in der Nähe der Schweissstelle waren die Drähte mit Emailleglas (weisses Einschmelzeglas) umgeben. Die Spitze der Schweissstelle habe ich vorsichtig abgeschliffen, so dass die beiden Drähte mit metallischem Querschnitt aussen von dem Emaillemantel umgeben zu Tage traten. Jeder Draht war seiner ganzen Länge nach durch einen Gummischlauch isoliert, der einerseits über die Fibercylinderchen, andererseits über die emaillierten Drähte gezogen und mit Seide festgebunden war. Die Schweissstelle befand sich also im Innern des Druckcylinders und zwar an der Stelle, wo das Versuchswasser die Capillare verliess. [bei o Fig. 5.] Im Verlaufe der Versuche wurden jedoch ganz besonders durch die hohen Temperaturen und hohen Drucke die sonst gut isolierenden und vorzüglich dichtenden Vulkanfiberstücke infolge beträchtlicher Wasseraufnahme leitend; es gaben die Drähte einerseits (Pd, Fe), die Rotgussdeckelscheibe andererseits ($x\,Cu + y\,Zn$), getrennt durch die wasserhaltigen leitenden Fiberstücke Veranlassung zu elektromotorischen Kräften, welche die geringe elektromotorische

Kraft des Thermoelementes weit übertrafen. Versuche, das hygroskopische Fiber durch andere Materialien zu ersetzen (Stabilit), scheiterten daran, dass die Dichtung nicht zu erreichen war. Sorgfältig emaillierte Drähte (in Gaggenau, Baden) einzuführen war ebenfalls, aus demselben Grunde wie oben, erfolglos. Alle Kittversuche schlugen fehl.

Um nun über die Temperatur im Inneren des Compressionscylinders genaueren Aufschluss zu erhalten, schlug ich folgenden, auch von Herrn Galopin[1] benützten Weg ein. Die eiserne Stange, an welcher der Viscositätsapparat befestigt war, wurde durch ein Mannesmannrohr M ersetzt; dasselbe war unten zusammengeschweisst, es wurde in die Deckelscheibe des Presscylinders eingeschraubt und eingelötet. Im Inneren des Rohres befand sich Quecksilber. In dieses Rohr wurde ein in Zehntelgrade geteiltes Normalthermometer aus Jenenser Normalglas eingesenkt. Der Stiefel dieses Thermometers (vom Quecksilbergefäss bis zum unteren Skalaende reichend) war hinreichend lang; die Skala von 15° aufwärts, ragte über den Rand des Bottich heraus. Abgelesen wurde das Thermometer mit Fernrohr. An der betreffenden Stelle wurde das Rohr mit Glasolin behandelt, so dass die aus dem Wasserbad aufsteigenden Dämpfe sich an dem Thermometer nicht kondensierten. Ohne dieses vorzügliche Mittel, das ich auch für meine Brille anwandte, hätte ich die Versuche in der Nähe von 100° kaum durchführen können. Das Thermometer war ein Einschlussthermometer. Im Innern derselben waren an der Rückseite der Milchglasksala zwei Correktionsthermometer von 0° bis 100° [in ganze Grade eingeteilt] angebracht, sie waren zur Ermittlung der Correktion des herausragenden Fadens bestimmt. Das Mannesmannrohr M (Fig. 5) diente gleichzeitig als Befestigungsstange für den Viscositätsapparat. Letzterer war am oberen Ende der Capillaren, an der Einmündungsstelle in die Gefässe und am Ansatzröhrchen u mit Stabilithohlcylindern an passenden eisernen Klemmen K befestigt, die ihrerseits an das Mannesmannrohr M angeschraubt waren.

---

[1] Effets thermiques dus à la compression. Thèse présentée à la faculté des sciences de l'université de Genève par Paul Galopin [dans le laboratoire de M. Raoul Pictet]. Genève, 1893.

Nach einer Versuchsreihe wurde die Lötung am Mannesmannrohr rissig. In der Folge wurde das Mannesmannrohr durch einen gebohrten Flintenlauf, geliefert von der Gewehrfabrik Mauser in Oberndorf, ersetzt. Dieses Stahlrohr hatte oben eine Verdickung, so dass es möglich war, das eingeschraubte Rohr gegen die Deckelscheibe mit einem Bleiring abzudichten. Bei diesem Stahlrohr wurde keinerlei Undichtigkeit oder Deformation beobachtet.

Zunächst wurden nun bei verschiedenen Temperaturen Versuche über den Temperaturausgleich zwischen Wasserbad, Compressionscylinder, Versuchswasser, Quecksilber im Stahlrohr angestellt. Der ganze Apparat war so wie bei den Versuchen selbst zusammengestellt. In dem Viscositätsapparat war ein Eisenkonstantanelement isoliert eingesetzt. Zur Isolation dienten dickwandige Paragummischläuche. Die Schweissstelle befand sich an der Stelle n (Fig. 5), so dass also die Temperatur des Wassers unmittelbar vor dem Eintritt in die Capillare jeweils angegeben wurde. Ein zweites Thermoelement befand sich in dem Stahlrohr an der Stelle, wo bei den Versuchen das hochempfindliche Normalthermometer sich befand.

Da in der Nähe des physikalischen Instituts elektrische Strassenbahnen vorbeiführen, ausserdem das Rührwerk und der Ventilator durch je einen Elektromotor getrieben wurden und durch das Ingangsetzen der Versuche grosse Eisenmassen ihren Ort wechselten, so konnte für die Messung der elektromotorischen Kraft der Thermoelemente nur ein Depretz-d'Arsonvalgalvanometer in Betracht kommen. Von Vorteil war die grosse Empfindlichkeit und rasche Einstellung infolge der Dämpfung. Die Aichung der Thermoelemente ergab eine mit den Untersuchungen der Herren Dewar und Flemming[1] gut übereinstimmende Curve. Ein drittes Thermometer war durch eine Bohrung der Deckelscheibe in das Innere des Compressionscylinders eingeführt, ein viertes schwamm auf dem Wasserbad.

Ich gebe auf Tafel I eine graphische Darstellung des Temperaturganges und bezeichne in folgender Weise die Temperaturen der Thermometer (bezw. Thermoelemente).

---

[1] Phil. Mag. 40. p. 95. 1895.

t_1 Temperatur des Wassers im Reibungsapparat,
t_2 „ „ Quecksilbers im Stahlrohr,
t_3 „ „ „ „ Compressionscylinder,
t_4 „ „ Wassers im Wasserbad.

Die Abscissen geben die Zeiten (2 mm = 1^m], die Ordinaten die Temperaturen [$^1/_{10}{}^0$ C = 5 mm].

Es wurde ein regelrechter Versuch angestellt. Die Temperatur im Wasserbad wird anfangs möglichst konstant gehalten. Wie der Curvenverlauf zeigt, giebt das Thermoelement in dem Stahlrohr erst ca. 27 min. nach dem Einsenken des Apparates eine Temperatur an, die mit der Temperatur des Versuchswasser im Reibungsapparat übereinstimmt.[1] Während von $5^h\,23^m$ durch Abstellen des Dampfes die Temperatur des Wasserbades sinkt, bleiben die beiden inneren Thermometer infolge der grossen Trägheit der sie umgebenden Medien zurück. Die gleiche Erscheinung zeigt sich bei einer Temperatursteigerung des Wasserbades; auch hier bleibt das innerste Thermometer (das Thermoelement im Reibungsapparat) am weitesten zurück. Der Gleichgewichtszustand wird bei sich ändernder Wasserbadtemperatur überhaupt nicht erreicht. Bleibt die äussere Temperatur aber konstant, so nähern sich die inneren Temperaturen der äusseren sehr langsam.

Die Reibungsversuche selbst wurden nun so eingerichtet, dass erst nach dem Ausgleich der Temperaturen der eigentliche Versuch begann, siehe Tafel I Punkt X. Es wurde also zunächst bei jedem Versuche möglichst konstante Temperatur hergestellt, durch beständiges Rühren des Wassers und Regulieren des Dampfzuflusses.

Die Viscositätsapparate selbst waren so konstruiert, dass vom Eintauchen des Apparates in den Cylinder bis zum Eintritt des I. Kontaktes $^1/_2{}^h$ und mehr verfloss, ausserdem wurde der ganze Apparat an einem Handgriff G (Fig. 5) in das konstant gehaltene Wasserbad hereingehängt, ebenso die 5 kg schwere Überwurfmutter u. s. w., um das einmal erreichte Temperaturgleichgewicht nicht wesentlich mehr zu stören, so dass mithin die Versuche nach erfolgtem Temperaturausgleich stattfanden.

---

[1] Das Sinken der äusseren Wasserbadtemperatur bei a (Taf. I) mag den Zeitpunkt X des Temperaturausgleiches etwas aufgeschoben haben.

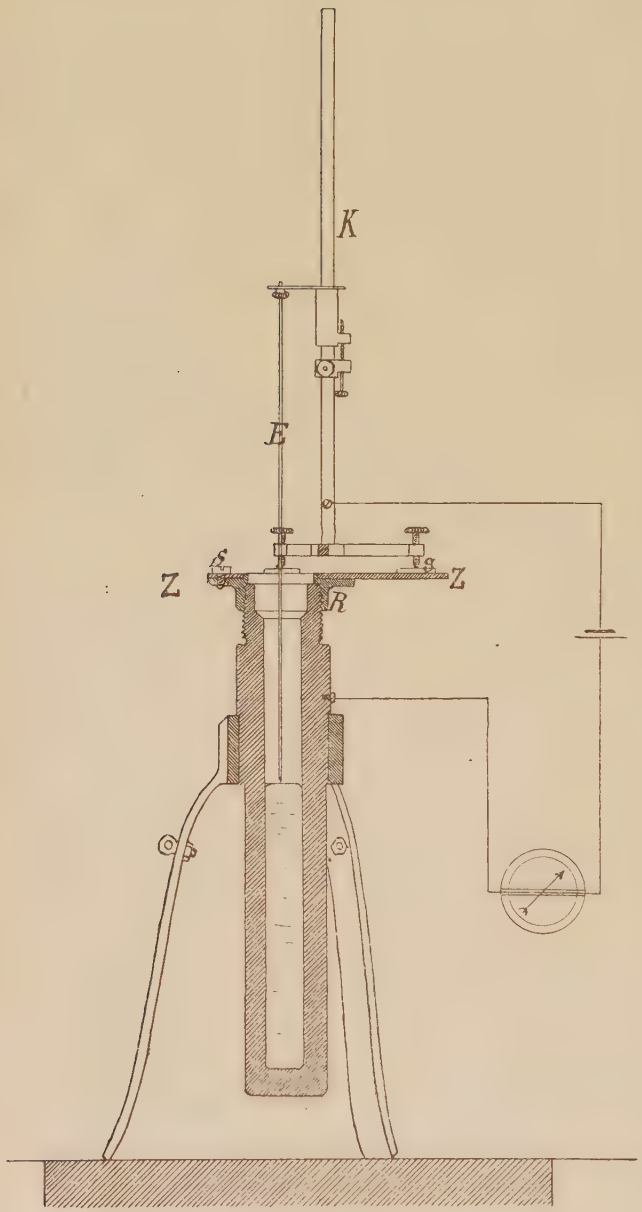


Fig. 8.

4. Es wurden im ganzen zwei Versuchsreihen ausgeführt, bei der einen[1] erfolgte der Ausfluss unter Quecksilber, bei der andern[2] unter Wasser.

Im ersten Falle war der Überdruck gegeben durch die Abstände der Platinelektroden von dem Ende der Capillaren.

Im zweiten Falle durch die Abstände der Platinelektroden von den Niveauständen zur Zeit der eintretenden Contakte. Damit im letzteren Falle der Ausfluss bei gleichen[3] Druckhöhen erfolgte, wurde bei den einzelnen Versuchen eine konstante Quecksilbermenge angewendet; dieses war der Fall, wenn bei derselben Temperatur von Press-

[1] Versuchreihe II.
[2] Versuchsreihe I.
[3] Bis auf eine Correction.

cylinder und Quecksilber der Niveauabstand des Quecksilbers von einem bestimmten Punkt auf dem oberen Cylinderrand konstant war. In dem vertikal gestellten Presscylinder wurde dieser Abstand mittels eines Kathetometers in folgender Weise gemessen (Fig. 8):

Ein Ring von Messing R konnte auf den Cylinder aufgeschraubt werden. An diesen Ring wurde eine Zinkplatte ZZ zur Aufstellung des Kathetometers K durch Schrauben S befestigt. Der Kathetometerschlitten trug an Stelle des Fernrohres eine Messingstange, in welche an ihrem äusseren Ende ein hinreichend langer Eisenstab E mit feiner Spitze eingeschraubt wurde. Die Stellschrauben des Kathetometers standen auf Glasplättchen g, so dass das Kathetometer vom Compressionscylinder isoliert war. Kathetometer und Quecksilber waren in den Stromkreis eines galvanischen Elementes eingeschaltet, in dem sich ein Galvanoskop befand. Nachdem das Kathetometer mit der Libelle senkrecht gestellt war, wurde die Eisenspitze auf die blanke Stelle des Cylinderrandes eingestellt und der Nonius abgelesen; ebenso wurde bei dem Quecksilberniveau verfahren. Die jedesmalige Berührung liess sich durch die Bewegung der Galvanoskopnadel feststellen. Die Differenz der Ablesungen ergab den Höhenunterschied. Diese Art mittelst elektrischer Kontakte die Niveautiefe des Quecksilbers im Cylinder zu bestimmen, bewährte sich sehr gut, wie aus folgenden Beobachtungen hervorgeht:

Einstellung auf den Cylinderrand	195.20	195.16	195.16
„ „ das Hgniveau	96.98	96.90	96.92
Niveautiefe bei $t = 14.5^0$ C	98.22	98.26	98.24

Dass der Viscositätsapparat selbst keine Verschiebung erfahren hatte, stellte ich in folgender Weise fest. Vor und nach jedem Versuche wurde nämlich der Abstand des oberen, senkrecht abgeschliffenen Endes O der Capillaren von der unteren Ebene P der Deckelscheibe mittels Kalibermassstabes (Nonienablesung $^1/_{10}$ mm) gemessen. Nie wurde eine Verrückung des Apparates bei irgend einem der vielen Versuche beobachtet. Der Compressionscylinder und hiemit auch der Viscositätsapparat stand selbstverständlich bei allen Versuchen vertikal; es liess sich das vermittelst des herausragenden Thermometer-Schutzrohres (bei R aufgeschraubt s. Fig. 5) leicht feststellen.

5. Gang eines Versuches bei 90°. Der [mit Dosenlibelle] vertikal gestellte Presscylinder steht in dem Wasserbad von der Temperatur 20°. Es wird nun die Niveautiefe des Quecksilbers gemessen, ferner der Abstand des Capillarendes von der Deckelscheibe, um eine eventuelle Verschiebung des Apparates durch den hohen Druck nach dem Versuch ermitteln zu können.

Der Cylinder wird nach abgeschraubtem Ring R mit Zinkplatte etwas gehoben, so dass der Cylinderrand höher steht, als das Überaich des Wasserbades. Das grosse Ventil V zum Dampfeinlass wird geöffnet zum Erhitzen des Wasserbades. In das Wasserbad wird ein unten geschlossener Messingcylinder zum Vorwärmen des Viscositätsapparates mit destilliertem Wasser gefüllt eingesenkt, ebenso eine Kochflasche mit destilliertem Wasser zum Auffüllen des Compressionscylinders nach dem Eintauchen des Viscositätsapparates. Der gereinigte und mit heissem, destilliertem, absolut staubfreiem Wasser gefüllte, mit Schliffstücken oben und unten verschlossene Apparat, wird an seinem Handgriff G getragen, in den Messingcylinder eingehängt. Hat das Wasserbad 80° erreicht, so dass Wasserdämpfe in das Arbeitszimmer entweichen, so setzt man zum Absaugen der Dämpfe den Ventilator in Gang. Ist die Versuchstemperatur 90° erreicht, so wird das grosse Ventil V abgestellt und der Dampfzufluss durch das Ventil V_2 so reguliert, dass die Temperatur des Wasserbades konstant blieb. Nachdem auch die Temperatur des Quecksilbers in der Bombe und im Messingcylinder die Wasserbadtemperatur erreicht, wird die im Cylinder vorhandene Wasserschicht (Condensationswasser) in eine Quecksilberpipette mittels einer Bunsen'schen Wasserstrahlpumpe abgesaugt. Es gelang stets einen absolut staubfreien Quecksilberspiegel ohne irgend einen Quecksilberverlust herzustellen. Das Innere des Cylinders, das Stahlrohr und die eisernen Klemmen zeigten im Verlauf der Versuche bei höheren Temperaturen eine schöne, blauschwarze Farbe (Eisenoxyduloxyd), so dass absolut kein Rost sich bildete.

Der Apparat wird zu notierter Uhrzeit eingetaucht, der Cylinder mit Wasser aufgefüllt, und mittelst der Cailletet'schen Pumpe die Luft aus dem Verbindungsrohr zwischen Pumpe und Cylinder ausgestossen. Nun wird die ebenfalls im Wasserbad vorgewärmte Überwurfmutter aufgeschraubt, und mit den Schlüs-

seln und der Spannvorrichtung die Dichtung hergestellt. Der Cylinder wird herabgelassen, senkrecht gestellt, das Thermometer eingesenkt und mit einem Schutzrohr mit Schlitz [zum Ablesen der Skala] umgeben. Von zwei zu zwei Minuten werden die Temperaturen aussen im Wasserbad und innen im Stahlrohr abgelesen, und die Temperatur möglichst konstant gehalten. Der Druck bleibt fast immer konstant, nur in vereinzelten Fällen war ein Nachregulieren notwendig. Das Rührwerk tritt in Thätigkeit. Man konnte nun bis auf wenige Minuten den Eintritt des I. Kontaktes vorausberechnen; der Chronograph wird in Gang gesetzt und nach erfolgtem I. Kontakt die Uhrzeit mit dem Taster festgestellt.

Es handelt sich von jetzt ab um das Konstanthalten der Temperatur bis zum II. Kontakte, der bis auf wenige Sekunden vorausberechnet werden kann.

Äusserst praktisch war die Anwendung des Chronographen [ganz abgesehen von der genauen Ermittlung der Kontaktzeiten], da der Beobachter mit der Bedienung der Apparate und dem Notieren der Ablesungen beschäftigt, unbekümmert um das Eintreten der Kontakte arbeiten konnte, wenn der Chronograph nur rechtzeitig eingeschaltet wurde.

Versuche.

1. Ich teile im folgenden aus der Versuchsreihe, die im W.-S. 1898/99 ausgeführt wurde und 103 Versuche enthält einige beliebig herausgegriffene Versuche mit.

Versuche Nr. 38, 39, 40, 41, 42 bei 98°. Der Ausfluss erfolgte unter Wasser. Der Abstand des Capillarendes von der Deckelscheibe betrug vor und nach dem Versuche 104.0 mm. Die Nieveautiefe war 215.8 mm.

t_i sei die Temperatur im Stahlrohr,
t_a „ „ „ „ Wasserbad.

Benützt wurde die Hipp'sche Normaluhr mit Riefler'schem Pendel. Eine Korrektion wegen des Uhrganges wurde nicht angebracht, da dieselbe nur sehr gering war.

No. 38. P = o

Eintauchen des vorgewärmten Apparates $3^h\ 13^m$.

Uhrzeit	t_i	t_a
$3^h\ 19^m$	97.5	98.5
26^m	97.95	98.5
30^m	97.8	98.4
31^m	97.7	98.6

Nach dem Eintreten des Kontaktes werden die den Uhrzeiten $33^m\ 45^s$, 51^s, 56^s entsprechenden Sekundenpunkte zum Ausfall gebracht. Der Kontakt I berechnet sich hienach; er erfolgte um $3^h\ 33^m\ 31.05^s$. Es wurden nun bis zum Eintritt des II. Kontaktes folgende Temperaturen abgelesen:

Uhrzeit	t_i	t_a
$3^h\ 34^m$	98.0	98.5
36^m	97.65	98.5
39^m	97.85	98.5
41^m	97.70	98.6
44^m	97.80	98.7
47^m	97.60	98.5

Der Contakt II trat ein um $3^h\ 47^m\ 57.52^s$.

Die Durchflusszeit τ_0 beträgt demnach $14^m\ 26.47^s = 866.47^s$. Durch graphische Interpolation aus den abgelesenen Werten wurde die Temperatur 97.8° C ermittelt.

No. 39. P = o

Das Eintauchen des Apparates fand statt um $4^h\ 54^m$.

Uhrzeit	t_i	t_a
$5^h\ 6^m$	97.9	98.5
9^m	97.6	98.5
11^m	97.8	98.6
12^m	97.8	98.4
16^m	97.4	98.5
20^m	97.8	98.5
26^m	97.7	98.7

Eintreten des I. Kontaktes $5^h\ 15^m\ 55.56^s$
„ „ II. „ $5^h\ 30^m\ 22.88^s$
Durchflusszeit $\tau_0 = 14^m\ 27.32^s$
$= 867.23^s$
Temperatur $t_i = 97.7$

No. 40. P = o

Eintauchen $10^h\ 30^m$.

Uhrzeit	t_i	t_a
$10^h\ 42^m$	97.95	98.5
44^m	97.80	98.5
46^m	97.85	98.8
48^m	97.80	98.5
52^m	97.90	98.5
54^m	97.85	98.3
55^m	97.75	98.6
58^m	97.90	98.7
59^m	97.92	98.6
$11^h\ 1^m$	97.95	98.7
3^m	97.90	98.6
6^m	97.84	98.5

Uhrzeit des Kontaktes I $10^h\ 53^m\ 4.81^s$
„ „ „ II $11^h\ 7^m\ 30.84^s$
$\tau_0 = 14^m\ 26.03^s$
$= 866.03^s$
$t_i = 97.85.$

No. 41. P = 400.

Uhrzeit	t_i	t_a	P
$2^h\ 59^m$	97.95	98.5	400
$3^h\ 3^m$	97.7	98.3	400
3^m	97.7	98.4	400
5^m	97.7	98.8	400
6^m	97.7	98.6	400
7^m	97.7	98.5	400
9^m	97.7	98.3	400
10^m	97.65	98.6	400

Uhrzeit	t_i	t_a	P
$3^h\ 13^m$	97.70	98.3	400
16^m	97.75	98.6	400
18^m	97.85	98.7	400
19^m	97.84	98.5	400
21^m	97.9	98.9	440
24^m	97.95	98.5	400
Plötzliche Entspannung des Presscylinders	97.33		0

$\tau_p = 903.0^s$; $t_i = 97.7$.

No. 42. P = 400 (nicht ganz dicht).

Eintauchen $4^h\ 26^m$.

Uhrzeit	t_i	t_a	P
$4^h\ 39^m$	97.96	98.7	400
40^m	97.93	98.7	400
42^m	97.90	98.7	400
46^m	98.30	99.2	400
49^m	98.10	98.7	400
50^m	98.10	98.5	
51^m	98.05	98.8	
52^m	98.00	98.5	
54^m	97.80	98.5	390
56^m	97.85	98.5	400
58^m	97.90	99.1	380

$4^h\ 44^m\ 2.5^s$ Kontakt I

$4^h\ 59^m\ 4.0^s$ „ II

$\tau_p = 15^m\ 1.5^s = 901.5^s$

$t_i = 98.0^0$ C.

Zusammenstellung der Versuche No. 38, 39, 40, 41, 42.

No.	Druck	Temperatur	Durchflusszeit
39	0	97.70	867.23
38	0	97.80	866.47
40	0	97.85	866.03
41	400	97.7	903.0
42	396	98.0	901.5

Bildet man nun die Mittelwerte aus Temperatur und Durchflusszeit, so erhält man:

No.	Druck	Temperatur	Durchflusszeit
(39, 38, 40)*	0	97.78	866.58
(41 42)	398	97.85	902.3

Es wurde nun zu der Mitteltemperatur der Versuche bei hohem Druck eine Durchflusszeit für den Druck P = o berechnet:

(39, 38, 40)*	0	97.85	866.0
(41, 42)	398	97.85	902.3

Die prozentische Änderung der Durchflusszeit, [also auch des Reibungscoeffizienten][1] beträgt in der Nähe von 98°C bei einem Überdruck von 400 at. + 4 . 2 %. Die Viscosität wird also vergrössert.

Der Viscositätsapparat wurde neu montiert und bei nahezu derselben Temperatur die folgenden Versuchsresultate gewonnen. Die Druckhöhe war grösser als bei den vorhergehenden Versuchen.

No.	Druck P	Temperatur t	Durchflusszeit τ
44	0	97.6	871.2
43	0	97.7	871.0
45	400	97.6	906.2
46	400	97.7	909.3
(44, 43)	0	97.65	871.1
(45, 46)	400	97.65	907.7

$$\frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100 = + 4 . 2\%.$$

Diese Versuche geben trotz ihrer geringen Anzahl eine hinreichend gute Übereinstimmung mit den vorhergehenden. Da die Dichtungen des Verschlussstückes nur eine bestimmte Anzahl von Versuchen, ca. 100 aushalten, so musste auf ein Häufen der Versuche verzichtet werden.

Versuche bei 80°.

No.	P	t	τ
56	0	79.8	1067.8
57	0	79.9	1066.5
59	400	79.9	1103.6
60	400	79.9	1104.4

$$\frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100 = + 3 . 4\%.$$

[1] Nur annähernd richtig, siehe weiter unten.

Versuch bei 70°.

No.	P	t	τ
62	0	70.15	1215.7
64	0	70.20	1214.3
61	400	70.10	1252.8
63	400	70.15	1251.0

$$\frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100 = + 2.9\%$$

Diese genaue Übereinstimmung der letzten Versuche bei 80° und 70° schreibe ich dem Umstande zu, dass die äussere Wasserbadtemperatur möglichst konstant gehalten wurde (von Minute zu Minute wurden die Thermometer abgelesen und bei stetem Rühren der Dampfzufluss reguliert). Ich möchte als Beleg hiefür die vollständigen Beobachtungen zweier Versuche Nr. 56 und 57 mitteilen.

No. 56. P = 0.

Uhrzeit	t_a	t_i	
$10^h\ 12^m$	80.0	—	Anfang des Eintauchens
17^m	—	—	Ende „ „
18^m	80.0	79.45	
20^m	80.0	79.60	
23^m	80.05	79.75	
24^m	80.0	79.80	
26^m	80.0	79.78	
28^m	80.0	79.80	
30^m	80.0	79.82	
34^m	80.0	79.80	
36^m	79.9	79.80	
37^m	79.95	79.80	
$38^m\ 13.4^s$			Kontakt I
44^m	80.0	79.81	
46^m	80.0	79.83	
47^m	80.05	79.84	
50^m	79.95	79.84	
51^m	79.8	79.83	
53^m	79.8	79.75	
54^m	79.8	79.73	
55^m	79.8	79.73	
$56^m\ 1.2^s$			Kontakt II

Hiezu möchte ich noch folgendes bemerken. Obwohl der Viscositätsapparat, Überwurfmutter und einer der Mutterschlüssel, der am Sechseck des Cylinders lag, vorgewärmt waren, so dauerte es doch von $10^h\ 12^m$ bis $10^h\ 24^m$, mithin 12 min., bis das Temperaturgleichgewicht zwischen Wasserbad und dem Inneren des Compressionscylinders sich hergestellt hatte.

No. 57. P = o.

Uhrzeit	t_a	t_i	
$1^h\ 56^m$	81.0	78.7	
57^m	80.9	79.1	
58^m	80.6	79.4	
$2^h\ 0^m$	80.3	79.65	
1^m	80.05	79.70	
5^m	—	—	Apparat eingetaucht
8^m	—	—	Cylinder „
8^m	79.9	—	
9^m	80.0	79.35	
11^m	80.0	79.60	
17^m	79.8	79.85	
18^m	80.0	79.80	
20^m	80.05	79.84	
23^m	80.0	79.90	
24^m	79.90	79.90	
26^m	79.80	79.90	
27^m	79.90	79.87	
28^m	79.9	79.86	
$29^m\ 33.5^s$		Kontakt I	
31^m	80.0	79.87	
33^m	80.1	79.90	
34^m	80.05	79.93	
35^m	80.05	79.95	
38^m	79.9	79.94	
41^m	79.85	79.90	
47^m	80.0	79.90	
$47^m\ 20.0^s$		Kontakt II	

Versuche bei 55 bis 57°.

No.	P	t	τ
51	0	55.3	1512.1
52	0	55.7	1506.1
50	0	56.0	1495.2
48	0	56.2	1488.0
54	400	56.2	1527.8
53	400	56.6	1518.5
55	400	56.8	1514.6
49	[der II. Kontakt blieb aus].		

$$\frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100 = + 2.5\%.$$

Versuche bei 61°.

No.	P	t	τ
87	0	60.72	1058.5
90	0	60.78	1056.3
89	0	60.87	1056.0
88	0	61.09	1051.5
86	500	60.61	1091.2
85	500	60.86	1089.5

$$\frac{\tau_{500} - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100 = + 3.2\%.$$

Versuche bei 40° bis 41°.

No.	P	t	τ
66	0	40.45	1492
67	0	40.55	1491
68	400	40.5	1508
69	400	40.6	1510

$$\frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100 = + 1.3\%.$$

Versuche bei 31°.

No.	P	t	τ
72	0	30.80	1813.0
70	0	30.90	1809.5
74	400	30.80	1817.6
71	400	30.94	1811.6

$$\frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100 = + 0.2_2\%.$$

Versuche bei 20°.

No.	P	t	τ
82	0	19.96	2323.7
77	0	20.18	2313.6
[78	0	20.20	2325]
79	0	20.24	2310.0
75	400	20.17	2292.6
76	400	20.19	2292.0
84	400	20.20	2293.6
81	400	20.21	2295.6
80	400	20.26	2289.2
83	400	20.49	2281.8

Bei dem Versuche Nr. 78 wurde vor und nach dem Versuch ein winziges Partikelchen an der Capillareninnenwand beobachtet. Wie zu erwarten, wurde deshalb eine zu grosse Durchflusszeit gefunden, nämlich 2325$^{sec.}$ statt 2312.4 berechnet aus den Versuchen 77 und 79 durch lineare Interpolation.

Der Versuch wurde selbstverständlich verworfen.

$$\frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100 = -0.8\%.$$

Im folgenden gebe ich eine Zusammenstellung der Werte der prozentischen Änderungen der Durchflusszeiten bei Ausfluss unter Wasser; unter ε, E seien die mittleren Fehler der einzelnen Messung bezw. des Mittelwertes mitgeteilt:

t	$\frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100$	ε	E
98°	+ 4.2		
80°	+ 3.4		
70°	+ 2.9		
57°	+ 2.5	0.2	0.1
41°	+ 1.3		
31°	+ 0.2		
20°	— 0.8	0.05	0.02

Auf Tafel II sind die Grössen $100 \cdot \frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0}$ als Ordinaten, die Temperaturen als Abscissen aufgetragen. Trotz der sehr geringen Anzahl von Versuchen zeigt die Curve I einen stetigen Verlauf.

Diese Curve giebt uns nun, da der Ausfluss unter Wasser erfolgte, nur die prozentischen Änderungen der Durchflusszeiten in Abhängigkeit von der Temperatur für den Druckunterschied von 400 Atmosphären. In der Poisseuille'schen Gleichung

$$\eta = \frac{\pi}{8} \frac{r^4 p}{v l} \cdot \tau$$

werden jedoch alle Grössen r, v, l, p durch die hohen Pressungen modifiziert und wie Herr v. Röntgen[1] zeigte, fällt die Druckänderung am meisten ins Gewicht. Die hiedurch bewirkte Depression des Quecksilberniveaus ist in erster Linie bedingt durch die Compression des Quecksilbers, ausserdem durch die Deformation des Presscylinders, des Stahlrohres und des Viscositätsapparates.

Setzen wir in der Poisseuille'schen Gleichung den Ausdruck

$$\frac{\pi}{8} \frac{r^4}{v l} \quad \text{konstant} = k,$$

so erhalten wir, wenn p, p^1 die Druckunterschiede bezeichnen bei gewöhnlichem bezw. hohem Drucke, für die Viscositätscoeffizienten η_0 und η_P folgende Ausdrücke:

$$1)\ \eta_0 = k \,.\, p \,.\, \tau_0,$$
$$2)\ \eta_P = k \,.\, p^1 \,.\, \tau_P.$$

Die Abnahme des Druckunterschiedes, welcher das Fliessen des Wassers durch die Capillare bewirkt sei Δp; dann ist

$$p^1 = p - \Delta p,$$

aus 1) und 2) folgt

$$\frac{\eta_P}{\eta_0} = \frac{p^1}{p} \cdot \frac{\tau_P}{\tau_0} = \left(1 - \frac{\Delta p}{p}\right) \frac{\tau_P}{\tau_0}$$

$$\frac{\eta_P - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = \frac{\tau_P - \tau_0}{\tau_0} \cdot \left(1 - \frac{\Delta p}{p}\right) \cdot 100.$$

Um die prozentischen Änderungen der Viscosität durch die hohen Drucke zu erhalten, haben wir an den mitgeteilten entsprechenden Werten für die Ausflusszeiten eine Correktion anzubringen, deren Betrag sich annähernd berechnen lässt. Wie

[1] Röntgen, Wied. Ann. 22. p. 516. 1884.

ersichtlich, werden die Werte für $\frac{\eta_P - \eta_0}{\eta_0} . 100$ kleiner als die für $\frac{\tau_P - \tau_0}{\tau_0} . 100$ oben angegebenen.

Bezeichnet $\varkappa$ die Compressibilität des Quecksilbers, v das Volumen desselben bei t^0, q die Niveauoberfläche des Hg bei eingetauchtem Apparat, dh_1 die Tieferlegung des Niveau durch die Drucksteigerung dP, dv die entsprechende Volumverminderung, so gelten folgende Beziehungen:

$$1)\ dv = \varkappa . v . dP,$$
$$2)\ dv = q . dh_1,$$

somit

$$dh_1 = \varkappa . v . \frac{dP}{q}.$$

In unserem Falle war

$$v = 780\ cm^3$$
$$q = 16.3\ cm^2$$
$$dP = 400\ kg/cm^2,$$
$$\text{mit } \varkappa = 3.9 \times 10^{-7}\ ^{1,2}$$
$$\text{wird } dh_1 = 0.74\ mm.$$

Eine Berechnung der Deformationen von Cylinder und Stahlrohr ergiebt ein weiteres Sinken des Hg um $dh_2 = 0.3$ mm. Da bei den Versuchen eine mittlere Druckhöhe von 33 cm angewandt wurde, so ist die Druckhöhenänderung geringer als 0.3 %; die anzubringende Correktion mithin gering; es soll hier auf eine genaue Auswertung der Correktion nicht eingegangen werden, da weiter unten einige Versuche, die Depression $dh = dh_1 + dh_2$ experimentell zu bestimmen, beschrieben werden.

2. Beim Ausfluss unter Quecksilber fällt diese Correktion fort[3]; ich teile im folgenden Versuche mit, welche nach dieser Methode erhalten wurden.

Versuche bei 50°.

No.	Druck	Temperatur	Ausflusszeit
1	0	50.95	1174.8
2	0	50.97	1168

[1] Amagat, Ann. chim. phys. 11. p. 520. 1877.
[2] Amaury u. Descamps, C. R. 68. p. 1564. 1869.
[3] Cohen, Wied. Ann. 45. p. 670. 1892.

No.	Druck	Temperatur	Ausflusszeit
3	300	51.57	1176.3
4	300	51.70	1168.5
9	400	51.0	1187
6	400	51.2	1193
7	400	52.0	1211

$$100\,\frac{\tau_{300}-\tau_0}{\tau_0} = +1.3$$

$$100\,\frac{\tau_{400}-\tau_0}{\tau_0} = +1.6$$

Versuche bei 40° bis 41°.

No.	P	t	τ
18	0	40.00	1415.0
12	0	40.06	1415.7
11	0	40.20	1411.1
17	400	40.13	1423
14	400	40.47	1415.5
13	400	40.52	1413.3
16	500	40.67	1411.3
15	500	40.83	1440.0

$$100\,.\,\frac{\tau_{400}-\tau_0}{\tau_0} = +0.7\%$$

$$100\,.\,\frac{\tau_{500}-\tau_0}{\tau_0} = +2.0\%$$

Versuche bei 36°.

No.	P	t	τ
20	0	36.0	1530.6
19	400	35.94	1531.8

$$100\,.\,\frac{\tau_{400}-\tau_0}{\tau_0} = \pm 0.0.$$

Versuche bei 30° bis 31°.

No.	P	t	τ
22	0	30.23	1715
21	0	30.29	1713
23	400	30.3	1703
24	400	30.47	1712

No.	P	t	τ
25	400	30.53	1703
26	400	30.58	1700

$$100 \cdot \frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} = -0.5$$

Versuche bei 31°.

No.	P	t	t
29	400	31.30	1676
27	0	31.50	1671
28	400	31.60	1664

$$100 \cdot \frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} = \pm 0.0.$$

Versuche bei 33°.

No.	P	t	τ
31	0	32.83	1641
32	0	32.92	1614
35	0	32.92	1618
30	400	32.80	1624.6
33	400	32.90	1624.4

$$100 \cdot \frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} = \pm 0.0.$$

Es folge hier eine Zusammenstellung der prozentischen Änderungen der Reibungskoeffizienten für obige Versuchsreihe; bei Ausfluss unter Quecksilber sind sie durch die prozentischen Änderungen der Durchflusszeiten gegeben.

Temperatur	$\frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100$
30.5	-0.5
31.5	± 0.0
32.9	± 0.0
36.0	± 0.0
40.1	$+0.7$
51	$+1.6$

Aus obigen Versuchen folgt mit Sicherheit, dass die Viscosität des Wassers bei einer Temperatur zwischen 30° und 40° durch den Druck von 400 at. nicht geändert wird, oberhalb dieser

Temperatur wird der Reibungskoeffizient beim Übergang zu hohen Drucken grösser, unterhalb dieser Temperatur kleiner. (T sei die Temperatur für den Fall, dass $\eta_{400} = \eta_0$ wird.

Die Methode des Ausflusses unter Hg giebt als Fehler der Mittelwerte für die Versuche bei 30° ± 0.53 %. Herr Cohen findet bei seinen Versuchen ebenfalls ± 0.5 %. Nun ändert sich aber die Grösse $100 \frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0}$ in dem Temperaturintervall 30° bis 40° nur um 1 %, mithin bedingt ein Fehler von ± 0.5 % die grosse Unsicherheit in der Lage der Temperatur T. Obgleich über 100 Versuche nach der Methode des Ausflusses unter Quecksilber angestellt wurden, gelang es nicht, eine stetige Curve zu erhalten, wie bei der Methode des Ausflusses unter Wasser.

Es ist eben das Loslösen des Wassertropfens von dem Ende der Capillaren keine regelmässige Erscheinung. Bekanntlich unterliegt auch die Methode, eine Capillarkonstante durch Abtropfen zu bestimmen, mancherlei Fehlerquellen. Ich führe noch einige Versuche aus dem W. S. 1898 an, welche dies deutlich zeigen.[1]

Versuche bei 18°.

No.	P	t	τ
3	0	17.87	3630.0
4	0	18.05	3617.0
5	0	18.24	3602.4
2	400	18.07	3558.0
1	400	18.10	3555.0

$$\frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = -1.6.$$

Versuche bei 29°.

No.	P	t	τ
9	0	28.84	2827
8	0	29.75	2762
6	400	29.16	2796
7	400	29.45	2774

$$\frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = -0.3.$$

[1] Wüllner, Lehrbuch der Experimentalphysik. Bd. I. p. 448, oben. 1895.

Versuche bei 55 bis 57°.

No.	P	t	τ
16	0	55.5	1340
17	0	56.7	1314
13	350	55.4	1369
14	300	56.2	1344
15	400	56.5	1347
(16, 17)	0	56.1	1327
(14)*	0	56.2	1325
(13)*	0	55.4	1341
(15)*	0	56.5	1319
14	300	56.2	1344
13	350	55.4	1369
15	400	56.5	1347

$$\frac{\eta_{300} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = 1.4\,\%,$$

$$\frac{\eta_{350} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = 2.1\,\%,$$

$$\frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = 2.1\,\%.$$

Mit der Annahme, dass sich für geringe Druckunterschiede die prozentische Änderung der Viscosität proportional den Drucken ändert, kann man die obigen Werte für 300 bezw. 350 reduzieren auf 400 und erhält alsdann

$$\frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = \frac{2.4}{1.9}$$

mithin als Mittelwert 2.1 % in Übereinstimmung mit dem direkt ermittelten Werte aus Versuch Nr. 15. Diese nicht ganz einwurfsfreie Art der Berechnung wurde ausnahmsweise nur in diesem Falle angewandt, um die fünf Versuche Nr. 13 bis 17 nicht unberücksichtigt zu lassen.

Versuche bei 70° bis 71°.

No.	P	t	τ
22	0	70.4	1076
20	0	70.6	1078
21	0	71.0	1075
19	300	70.3	1113

No.	P	t	τ
23	400	70.0	1107
18	400	70.4	1113
25	400	70.6	1102
24	400	70.9	1103

$$\frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = +2.5.$$

Versuche bei 79° bis 80°.

No.	P	t	τ
30	0	79.4	1554
26	0	79.4	1568
31	0	79.5	1556
[29	0	79.8	1448][1]
34	0	80.0	1554
35	0	80.1	1548
27	400	79.5	1598
33	400	79.5	1592
[28	400	79.5	1560][1]
32	400	79.8	1594

$$\frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = +2.6.$$

Versuche bei 80° bis 81°.

No.	P	t	τ
78	0	80.8	1541
74	0	80.8	1535
77	0	80.9	1512
72	300	80.3	1549
75	300	80.9	1541
76	300	80.9	1564
73	fehlt.		

$$\frac{\eta_{300} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = +1.3.$$

[1] Versuch 29 und 28 wurde verworfen, da die Ausflusszeit viel zu klein ausfiel; ein Grund konnte allerdings nicht ermittelt werden.

Versuche bei 90° bis 91°.

No.	P	t	τ
47	0	89.5	1365
53	0	89.9	1357
36	0	89.9	1375
49	0	90.1	1353
45	0	90.2	1357
42	0	90.3	1368
43	0	90.3	1359
41	0	90.3	1352
46	0	90.5	1349
44	0	90.8	1343
48	0	90.9	1348
51	400	89.5	1411
38	400	90.1	1409
37	400	90.2	1407
39	400	90.3	1403
40	400	90.5	1399
52	400	91.0	1390

$$\frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = +3.4.$$

Versuche bei 97° bis 98°.

No.	P	t	τ
57	0	97.2	1247
55	0	97.3	1246
56	0	97.3	1244
58	0	97.4	1242
59	0	97.7	1240
60	0	98.4	1234
68	0	98.8	1227
69	0	98.8	1227
71	300	97.8	1273
70	400	98.3	1278
61	400	98.3	1277
63	400	98.4	1279
64	400	98.4	1276
66	400	98.6	1272

No.	P	t	τ
67	400	98.6	1272
62	400	98.2	1305

$$\frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100 = + 3.6.$$

Zusammenstellung der Werte $\frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0} \cdot 100$, bei Ausfluss unter Hg.

t	
98	+ 3.6
90	+ 3.4
80	+ 2.6
70	+ 2.5
56	+ 2.1
51	+ 1.6
40	+ 0.7
36	± 0.0
33	± 0.0
31	± 0.0
29	— 0.3
18	— 1.6

3. Vergleicht man die Werte der vorstehenden Tabelle mit den entsprechenden auf S. 35 gegebenen, so findet man, dass die Methode des Ausflusses unter Wasser grössere Werte liefert. Dieses rührt von der oben erwähnten Depression des Quecksilberniveaus her. Es wurde nun direkt experimentell die Korrektion der Druckhöhenänderung zu bestimmen gesucht. Es geschah dies durch Bestimmung der Hebung des Viscositätsapparates hinsichtlich des Quecksilberniveaus in folgender Weise:

Oberhalb des Hg-Niveaus bei eingetauchtem Apparat waren an dem Stahlrohr mittelst einer eisernen Klemmvorrichtung durch Stabilit vom Stahlrohr isoliert zwei Nadeln N_1, N_2 befestigt. (Fig. 1.) Die Nadelspitzen befanden sich in verschiedener Höhe, sie waren bei eingesenktem Apparat im Quecksilber untergetaucht. Die Nadeln waren mit den Kupferdrähten in metallischer Verbindung. Der Viscositätsapparat war abmontiert, da die Volumverminderung seiner Glasmasse durch die Compression zu vernachlässigen ist gegenüber der Volumverminderung der Queck-

silbermasse. Von den Kupferdrähten führten zwei Drähte über einen Umschalter $^{2}_{3}{}^{1}$ zu einem galvanischen Element E und einem Galvanoskop G und zurück zum Cylinder. Wurde nun Druck mittels Glycerin [um ein Oxydieren der Nadelspitzen zu vermeiden] in dem Presscylinder hergestellt, so verliess bei einem bestimmten Drucke das Quecksilber zuerst die oberste Spitze, der Stromkreis wurde unterbrochen; das Galvanoskop zeigte die Unterbrechung an. Nachdem durch den Umschalter in der Stellung 23 der Stromkreis wieder geschlossen war, wurde bei weiterer Drucksteigerung durch das sinkende Quecksilberniveau der Stromkreis an der Nadelspitze N_2 unterbrochen. Selbstverständlich wurde der Temperaturausgleich zwischen innen und aussen abgewartet, da die Drucksteigerung von einer Temperaturerhöhung begleitet ist. Der Presscylinder stand senkrecht (mit Dosenlibelle eingestellt), und hiemit die untere Ebene der Deckelscheibe horizontal, also parallel dem Quecksilberniveau. Gemessen wurden nun die senkrechten Abstände der Nadelspitzen von der Deckelscheibe. Es ergab sich aus mehreren Bestimmungen als Vertikalabstand der Spitzen 0.40 mm. Die erste Spitze wurde vom Quecksilber bei 90 at. verlassen, die zweite bei 250 at. Bei einem anderen Versuche waren die entsprechenden Drucke 65 bezw. 235 at. Eine Druckzunahme von 160 bezw. 170 at. bewirkt ein Sinken des Quecksilbers um 0.40 mm. Hieraus ergiebt sich für 400 at. bei der angewandten Quecksilbermenge von 750 cm^3 eine Depression des Quecksilberniveau von 1 mm. Bei der angewandten mittleren Druckhöhe von ca. 33 cm wird die Druckhöhe unter dem Druck von 400 at. um ca. $^{1}/_{3}\,^{0}/_{0}$ verringert, mithin die Ausflusszeit entsprechend vergrössert. Der Überdruck p ist gegeben durch das Produkt h (s—σ), wenn s und σ die spezifischen Gewichte des Quecksilbers bezw. des Wassers bezeichnen, h sei die mittlere Druckhöhe. Bezeichnet $\varkappa$ und λ die Compressibilitätskoeffizienten von Quecksilber bezw. Wasser, d h die experimentell ermittelte Niveausenkung [herrührend von der Compression des Hg und den Deformationen des Cylinders], d L die Kürzung des Viscositätsapparates [L gemessen vom Capillarende bis zur Mitte des Gefässes zwischen den Elektroden], so wird, wenn p, p^1 die Überdrucke bei P = o und P = P bezeichnen,

$$\begin{array}{l} p^1 = h^1 (s^1 - \sigma^1) \\ p = h (s - \sigma) \end{array} \Bigg| \quad h^1 = h - dh - dL$$

$$\frac{p^1}{p} = \left(1 - \frac{dh + dL}{h}\right)\left(1 + \frac{s\varkappa - \sigma\lambda}{s - \sigma} P\right)$$

Mit $h = L = 330$ mm wird nach der Elastizitätstheorie $dL = 0.1$ mm; dh ist nach meinen Bestimmungen 1 mm. Mit den Werten $\varkappa = 39 \times 10^{-7}$ und $\lambda = 40.1 \times 10^{-6}$ wird

$$\frac{s\varkappa - \sigma\lambda}{s - \sigma} P = 0.0004.$$

Vernachlässigt man die kleinen Grössen dL und $\frac{s\varkappa - \sigma\lambda}{s - \sigma} P$, so erhält man für den Ausfluss unter Wasser

$$\frac{p^1}{p} = \left(1 - \frac{dh}{h}\right) = 1 - 0{,}003;$$

[bei Ausfluss unter Hg wird $dh = 0$, somit $p^1 = p$] beim Ausfluss unter Wasser wird hienach die Druckhöhe durch die Drucksteigerung um $^1/_3$ % verringert, infolge dessen ergiebt sich eine um denselben Betrag zu grosse Durchflusszeit. Es geben also die um ca. $^1/_3$ % verminderten Werte $\frac{\tau_P - \tau_0}{\tau_0} 100$ die wahren prozentischen Änderungen der Viscosität durch den Einfluss des Druckes. Dieses Resultat zeigt sich in Übereinstimmung mit der früher mitgeteilten Berechnung aus der Compression des Quecksilbers und den Deformationen von Cylinder und Stahlrohr. In der That nähern sich die Werte $\frac{\tau_{400} - \tau_0}{\tau_0} 100$ bei Ausfluss unter Wasser nach Anbringen der Korrektion den Werten $\frac{\eta_{400} - \eta_0}{\eta_0} 100$ bis auf $^1/_3$ %, siehe die Tafel II (Curve I^1 und II).

Das Wasser besitzt also in der Nähe von 32° einen kritischen Punkt hinsichtlich der Viscosität, d. h. bei Wasser von 32° ist der Reibungskoeffizient vollständig unabhängig von der Pressung, unter welcher dasselbe steht. [Minimum der specifischen Wärme bei ca. 30°!]

Im folgenden fasse ich die Resultate der Untersuchung zusammen.

1. In Übereinstimmung mit den Herren von Röntgen, Warburg und Sachs, und Cohen finde ich, dass die Viscosität des Wassers durch Druck bis zu Temperaturen von ca. 32° C. verringert wird.

2. Solange die Viscosität unter dem Einfluss des Druckes verringert wird, nimmt der Einfluss des Druckes mit steigender Temperatur ab; bei derselben Temperatur ist die Verringerung um so grösser, je höher die angewandten Drucke sind. Meine Versuche bestätigen die von Herrn Cohen gefundene Gesetzmässigkeit.

3. Während bisher ein Minimum der Viscosität des Wassers nicht gefunden wurde, habe ich nachgewiesen, dass in der Nähe von 32° der Reibungskoeffizient durch eine Drucksteigerung von 400 at. nicht geändert wird.

4. Oberhalb dieser Temperatur wird die Viscosität durch den Druck von 400 at. vergrössert, unterhalb derselben verringert. Man hatte bisher nur eine Verringerung der Viscosität durch Druck gefunden.

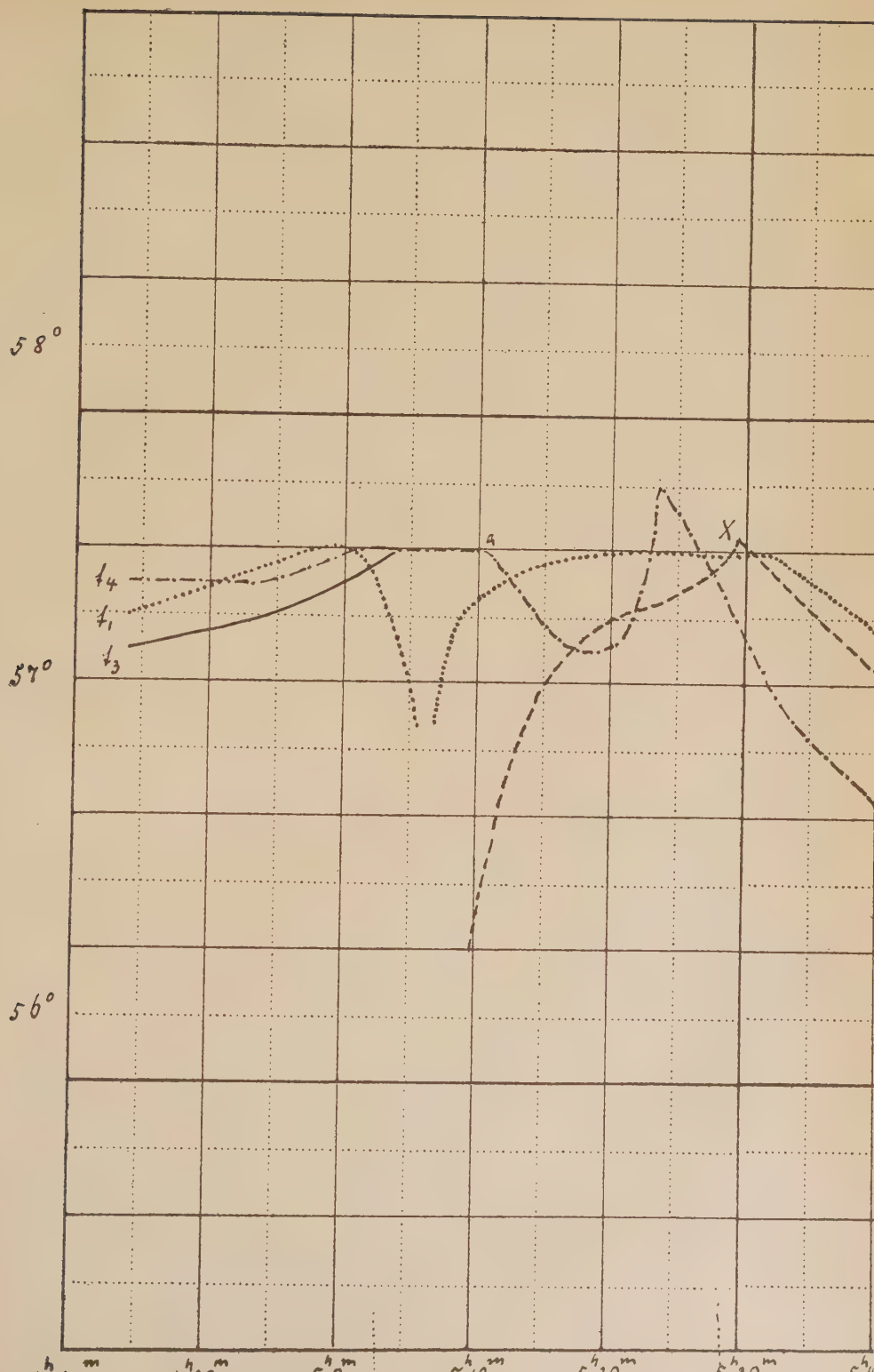
5. Die Zunahme der prozentischen Änderung der Viscosität oberhalb des kritischen Zustandes (ca. 32° bei dem Druck von 400 at.) ist bei konstantem Druck um so grösser, je höher die Temperatur. Sie beträgt in der Nähe von 100° bei 400 at. ca. 4%.

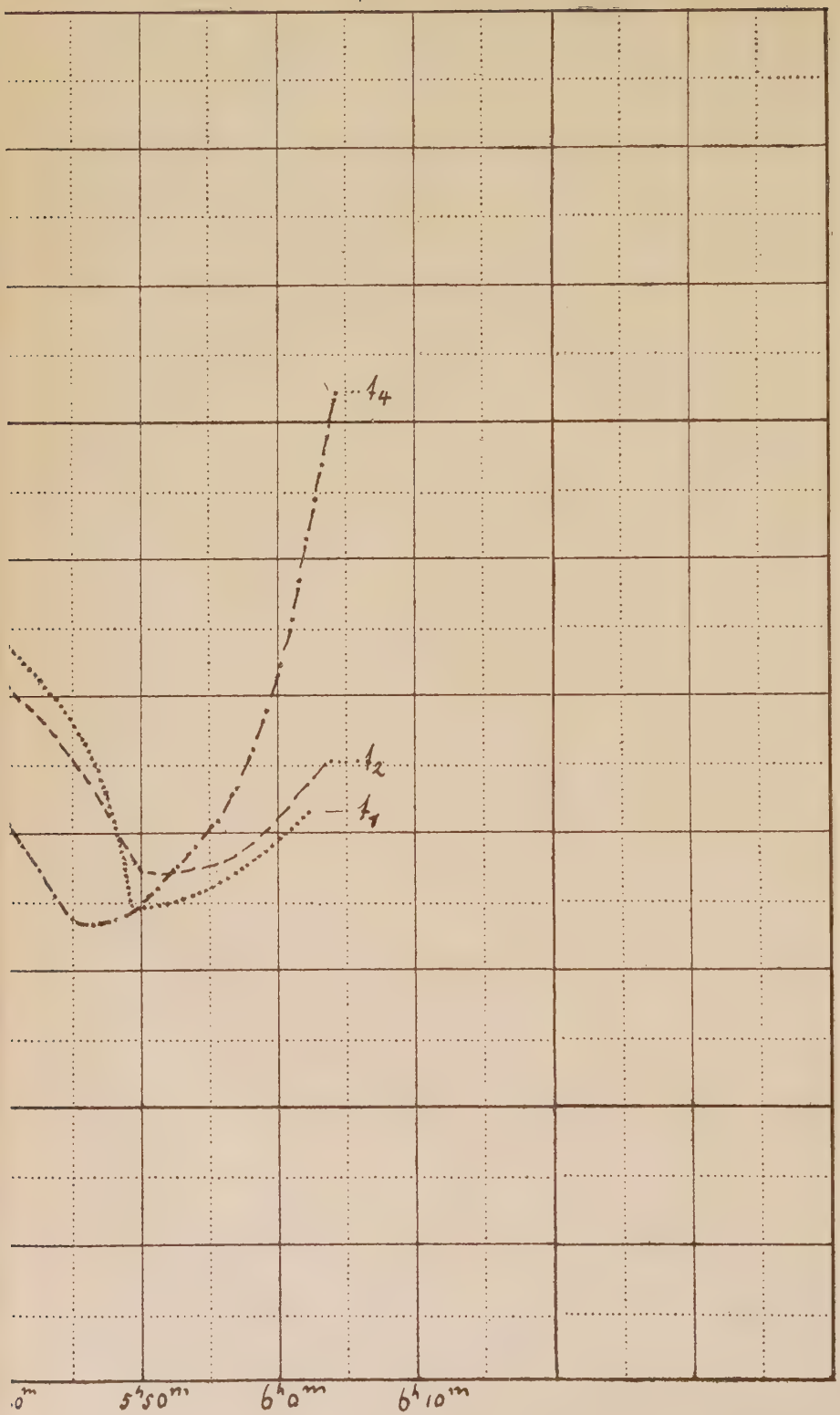
6. Bei höheren Temperaturen ist die Zunahme der Viscosität bei derselben Temperatur um so grösser, je höher der Druck ist (gültig für das Druckintervall 300 bis 500 at.).

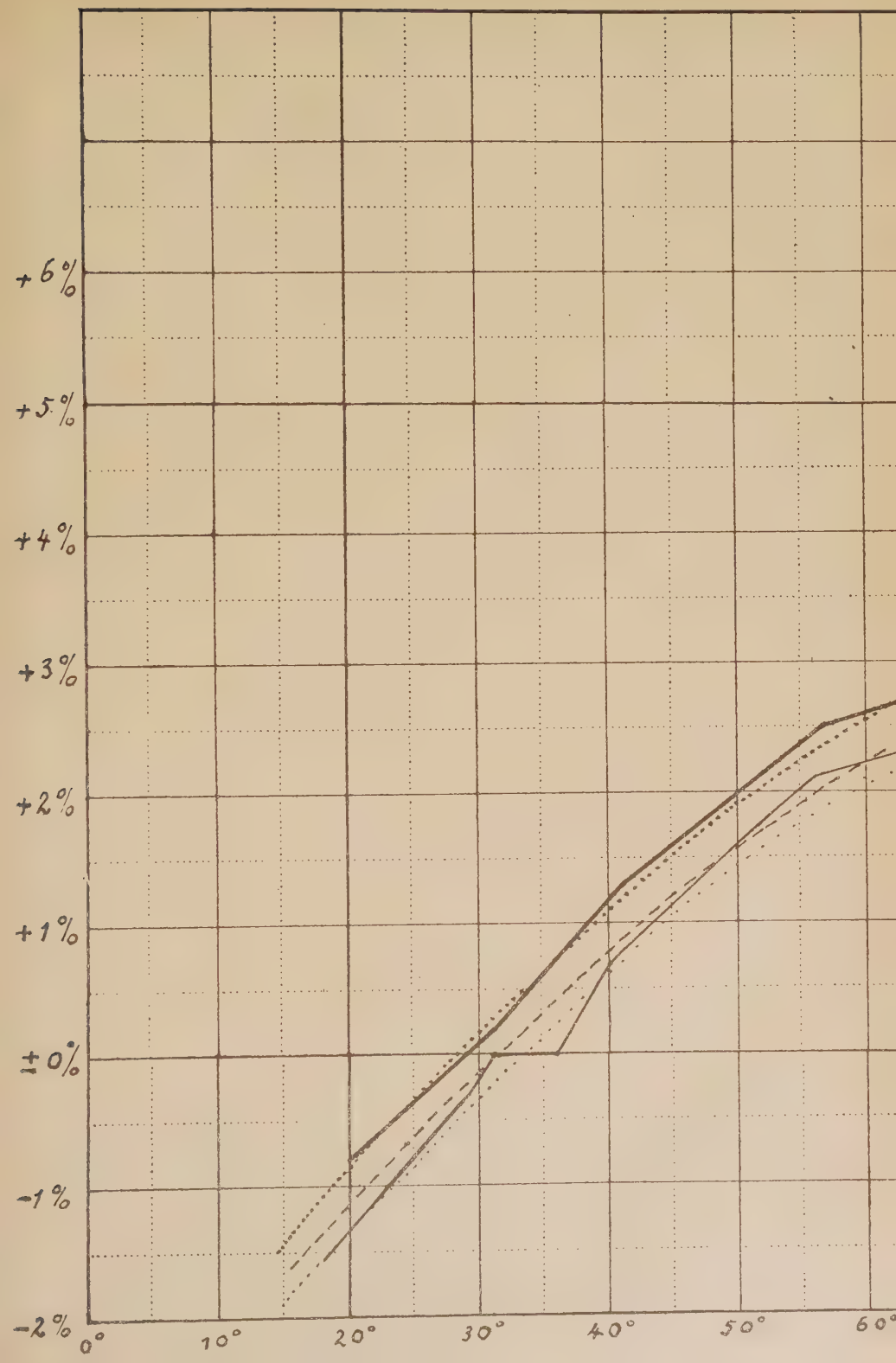
7. Ob das Wasser für die verschiedenen Drucke die Lage des kritischen Punktes sich ändert mit dem Druck, oder ob die Temperatur von ca. 32° für alle Drucke den kritischen Punkt giebt, ist durch die Versuche nicht erhärtet; es sind oberhalb und unterhalb 32° nur Versuche bei 400 at. in hinreichender Anzahl angestellt worden. Der Verlauf der Kurven für 300, 400, 500 at. macht es wahrscheinlich, das dass Wasser in der Nähe von 32° für alle Drucke dasselbe Verhalten hinsichtlich seiner Zähigheit zeigt. Sowohl die Kurven von Herrn Cohen von 0° bis 25° für die Drucke 100, 300, 600 at., als die in Tafel II dargestellten oberhalb 32° für die Drucke 300, 400, 500 konvergieren gegen einen Punkt der Abscissenaxe.

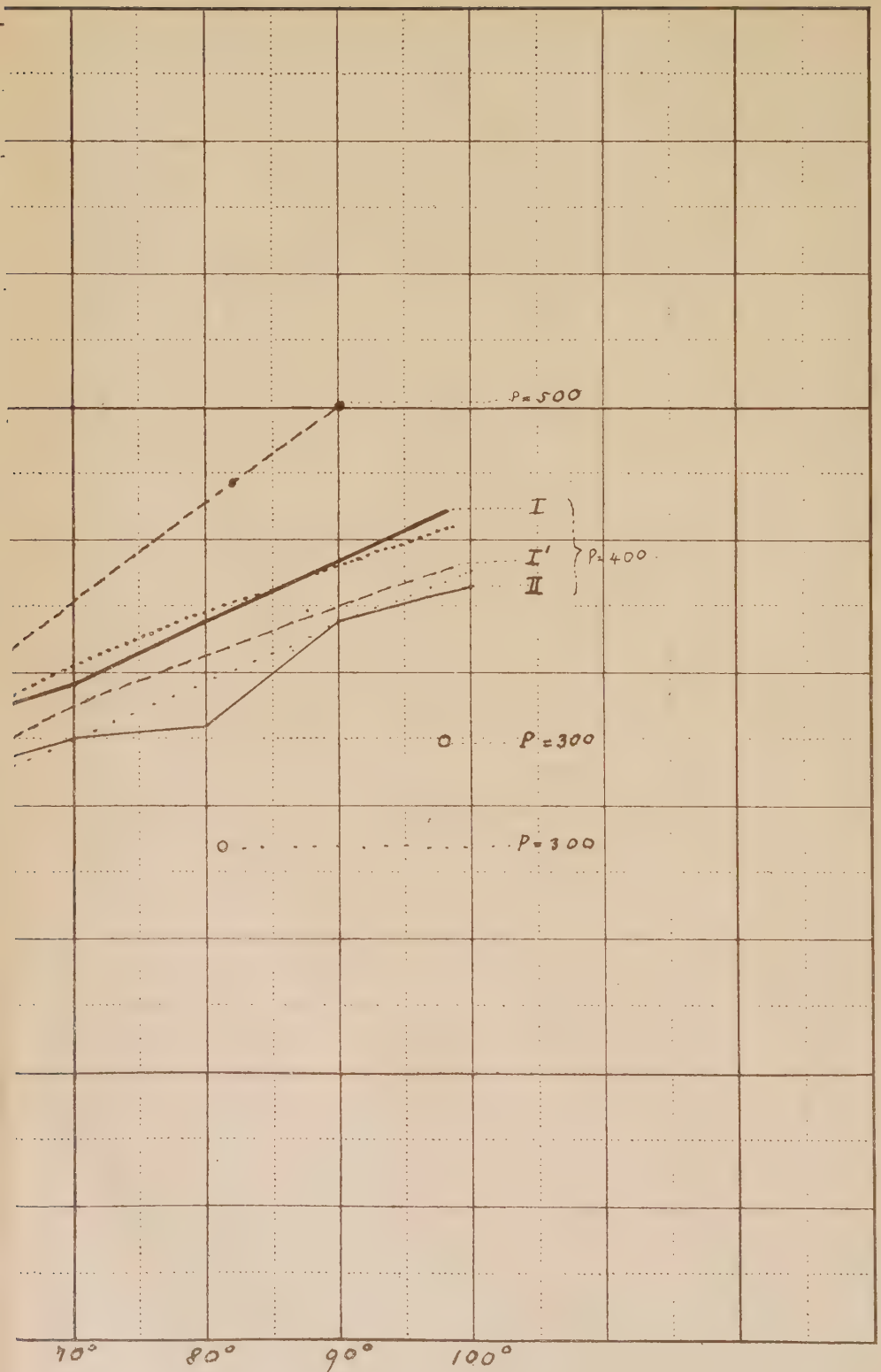
Zum Schluss möchte ich Herrn Professor Dr. K. R. Koch für die Anregung zu der vorliegenden Untersuchung und seine mannigfachen Ratschläge meinen besten Dank aussprechen.

Stuttgart, Physik. Inst. der Techn. Hochschule. Juli 1900.


58°
57°
56°
t_4
t_1
t_3
a
X
4h40m
4h50m
5h0m
5h10m
5h20m
5h30m
Eintauchen.
Temperaturausgleich.


t_4
t_2
t_1
5h50m
6h0m
6h10m


+6%
+5%
+4%
+3%
+2%
+1%
±0%
-1%
-2%
0°
10°
20°
30°
40°
50°
60°


P=500
I
I'
II
P=400
P=300
P=300
70°
80°
90°
100°

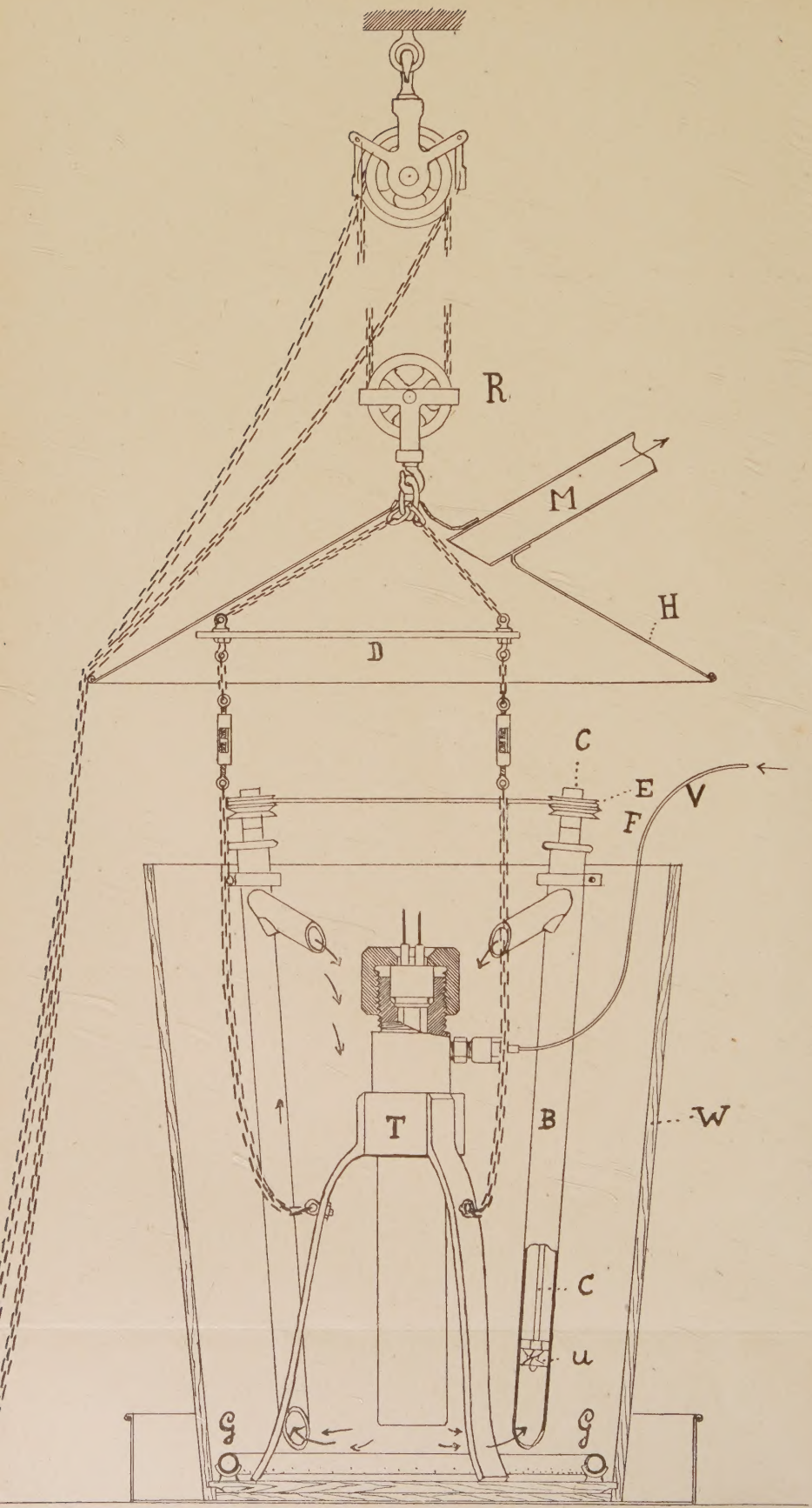


Fig. 9.